

В.Л. Ланин, А.П. Достанко, Е.В. Телеш

**ФОРМИРОВАНИЕ
ТОКОПРОВОДЯЩИХ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
В ИЗДЕЛИЯХ ЭЛЕКТРОНИКИ**



**БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

В. Л. Ланин, А. П. Достанко, Е. В. Телеш

**ФОРМИРОВАНИЕ
ТОКОПРОВОДЯЩИХ КОНТАКТНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ В ИЗДЕЛИЯХ
ЭЛЕКТРОНИКИ**

Минск
“Издательский центр БГУ”
2007

УДК 621.791.3: 621.396.6

ББК 34.64

Р е ц е н з е н т ы:

Член-корр. НАН Беларуси, д-р. техн. наук, профессор *В.А. Пилипенко*;
д-р. техн. наук, профессор *С.П. Кундас*

Л22

Ланин, В. Л. Формирование токопроводящих контактных соединений в изделиях электроники / В.Л. Ланин, А. П. Достанко, Е.В. Телеш. – Минск: Изд. центр БГУ, 2007.– 574 с. – ISBN 978–985–476–568–6.

В монографии обобщены результаты исследований и разработок в области теории, технологии и оборудования для формирования контактных соединений в изделиях электроники. Рассмотрены технологические процессы и оборудование для выполнения паяных соединений с применением интенсифицирующих воздействий в широком частотном диапазоне.

Издание предназначено для инженерно-технических работников предприятий электронной и других отраслей промышленности, специалистов научно-исследовательских институтов, аспирантов, магистрантов и студентов старших курсов технических вузов.

Табл. 74. Ил. 325. Библиограф. 500 назв.

Рекомендовано к изданию Советом Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники
29 ноября 2007 г., протокол № 3

© Ланин В.Л.,
и др. 2007

ISBN 978–985–476–568–6

**BELARUSIAN STATE UNIVERSITY OF INFORMATICS AND
RADIOELECTRONICS**

V.L. Lanin, A.P. Dostanko, E.V. Telesh

**FORMATION OF CURRENT-CARRING
CONTACT CONNECTIONS
IN ELECTRONICS PRODUCTS**

**Minsk
The publishing center of BSU
2007**

Reviewers:

V.A. Pilipenko, Corresponding member of National Academy of Sciences
Belarus, Science Doctor , Professor,
S.P. Kundas, Science Doctor, Professor

Lanin, V.L. Formation of current-carrying contact connections in electronics products / V.L. Lanin, A.P. Dostanko, E.V. Telesh.– Minsk: The Publish Center of BGU, 2007. – 574 p. – ISBN 978–985–476–568–6.

In the monograph results of researches and development are generalized in the field of the theory, technology and the equipment for formation of contact connections in electronics products. Technological processes and the equipment for performance soldering connections with application of intensifying influences in a wide frequency range are considered.

The edition is intended for technical officers of the enterprises electronic and other industries, experts of scientific research institutes, post-graduate students and students of the senior rates of technical universities.

Tables 74. Figures 325. References 500.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	13
Глава 1. КОНСТРУКЦИИ И ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К КОНТАКТНЫМ СОЕДИНЕНИЯМ	16
1.1. Классификация методов формирования соединений в изделиях электроники	16
1.2. Конструкционные паяные соединения и требования, предъявляемые к ним	21
1.3. Монтажные паяные соединения и их технологичность для производства	24
1.4. Эволюция контактных соединений в изделиях электроники	27
Глава 2. ОСНОВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ	37
2.1. Припой и специальные сплавы	37
2.2. Металлургия припоев и зависимость их свойств от наличия примесей	44
2.3. Флюсы для пайки	48
2.4. Припойные пасты для изделий электроники	52
2.5. Инертные и восстановительные газы	56
2.6. Защитные жидкости и покрытия для пайки	59
2.7. Материалы для очистки соединений	62
Глава 3. МАТЕРИАЛЫ СОЕДИНЕНИЙ И ОЦЕНКА ИХ ПАЯЕМОСТИ	65
3.1. Основные материалы паяных соединений в изделиях электроники	65
3.2. Методы оценки паяемости материалов	68
3.3. Оценка паяемости погружением в расплав	72
3.4. Методы оценки паяемости по капиллярному проникновению и по площади растекания припоя	76
3.5. Методы оценки паяемости по времени смачивания	84
3.6. Паяемость гальванических покрытий	87
3.7. Паяемость электронных компонентов	92
Глава 4. ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ И ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ ПРИ ПАЙКЕ СОЕДИНЕНИЙ	95
4.1. Лужение поверхностей соединяемых деталей	95
4.2. Методы флюсования при пайке соединений	100
4.3. Дозирование заготовок припоя при пайке	105
4.4. Ограничение площади растекания припоя	109
4.5. Методы очистки от остатков флюса	112
Глава 5. МЕТОДЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НАГРЕВА	117

5.1. Классификация методов нагрева и их сравнительная эффективность для пайки соединений	117
5.2. Оборудование и инструмент для нагрева теплопроводностью	122
5.3. Конвективные источники нагрева	127
5.4. Методы нагрева концентрированными потоками излучения	129
Глава 6. ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПАЙКИ СОЕДИНЕНИЙ	148
6.1. Пайка волноводов и элементов СВЧ трактов	148
6.2. Монтаж микроплат в корпуса микроблоков	150
6.3. Герметизация корпусов микроблоков пайкой	160
Глава 7. ТЕХНОЛОГИЯ МОНТАЖНОЙ ПАЙКИ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОНИКИ	165
7.1. Пайка и демонтаж с помощью паяльника и паяльных станций	165
7.2. Пайка элементов в отверстия печатных плат	175
7.3. Пайка элементов с планарными выводами	185
7.4. Методы пайки поверхностного монтажа	190
Глава 8. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ПАЙКА И МЕТАЛЛИЗАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ	197
8.1. Физические модели воздействия энергии ультразвукового поля на расплавы	197
8.2. Моделирование динамического воздействия ультразвуковой энергии на расплавы	207
8.3. Удаление оксидных пленок и интенсификация процесса смачивания	216
8.4. Диффузия и химическое взаимодействие расплавов с паяемыми материалами	231
8.5. Моделирование процессов диффузии в ультразвуковых полях	242
8.6. Оборудование и инструменты для ультразвуковой пайки и металлизации	257
8.7. Влияние параметров ультразвуковых процессов на прочностные и электрические свойства соединений	282
Глава 9. ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ПАЙКА СОЕДИНЕНИЙ	305
9.1. Особенности высокочастотного нагрева, выбор частоты нагрева	305
9.2. Способы и устройства высокочастотного нагрева	309
9.3. Моделирование и оптимизация параметров ВЧ нагрева	321
9.4. Оборудование и оснастка для высокочастотного нагрева	331
9.5. Технология ВЧ конструкционной и монтажной пайки	339
Глава 10. ИНФРАКРАСНАЯ И ЛАЗЕРНАЯ ПАЙКА СОЕДИНЕНИЙ	354

10.1. Особенности нагрева инфракрасным и лазерным излучением	354
10.2. Оборудование и процессы инфракрасной пайки соединений	363
10.3. Оптимизация температурных профилей ИК нагрева	376
10.4. Оборудование и процессы лазерной пайки соединений	384
Глава 11. ФОРМИРОВАНИЕ СОЕДИНЕНИЙ В ВАКУУМЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОННОГО И ИОННОГО ЛУЧЕЙ	403
11.1. Взаимодействие электронного и ионного лучей с материалами	403
11.2. Процессы ионно-лучевой пайки и лужения	407
11.3. Процессы электронно-лучевой пайки соединений	412
Глава 12. ФОРМИРОВАНИЕ СОЕДИНЕНИЙ В МИКРО-ЭЛЕКТРОНИКЕ	415
12.1. Монтаж кристаллов полупроводниковых приборов на эвтектику	415
12.2. Автоматизированный монтаж кристаллов вибрационной пайкой	423
12.3. Монтаж кристаллов транзисторов в корпусе D-ПАК и IGBT	430
12.4. Бессвинцовые припойные композиции для монтажа кристаллов	438
12.5. Пайка высокотемпературных сверхпроводниковых материалов	447
Глава 13. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СОЕДИНЕНИЙ	449
13.1. Методы контроля качества соединений	449
13.2. Методы контроля электрических и физико-механических свойств соединений	456
13.3. Методы контроля скрытых дефектов соединений	462
13.4. Надежность паяных соединений	472
Глава 14. ПРИМЕНЕНИЕ ИОННЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ГРАНИЦ «МЕТАЛЛ-АРСЕНИД ГАЛЛИЯ»	481
14.1. Ионно-лучевой синтез контактов с барьером Шоттки на арсениде галлия	481
14.2. Исследование характеристик потоков нейтральных и заряженных частиц в области подложки при ионно-лучевом распылении	483
14.3. Исследование эмиссионных спектров излучения плазмы при распылении металла	487
14.4. Влияние режимов ионно-лучевого распыления на характеристики контактов с барьером Шоттки на арсениде галлия	488
14.5. Влияние ионной очистки поверхности арсенида галлия и ионной бомбардировки растущей пленки на характеристики контактов с барьером Шоттки	491

Глава 15. ФОРМИРОВАНИЕ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С АЛМАЗОПОДОБНОЙ СТРУКТУРОЙ ИОННО-ЛУЧЕВЫМ И МАГНЕТРОННЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ 499

- 15.1. Свойства покрытий, полученных ионно-лучевым и магнетронным распылением 499
- 15.2. Формирование покрытий на поверхностях с алмазоподобной структурой ионным методом 505
- 15.3. Свойства тонкопленочных покрытий и параметров границ раздела при небалансном магнетронном распылении 510
- 15.4. Формирование покрытий ионно-лучевым распылением в режиме ионно-пучкового фокуса 514
- 15.5. Исследование параметров алмазных теплоотводов, металлизированных с применением разработанной технологии 518

Глава 16. МЕТАЛЛИЗАЦИЯ ПОЛИМЕРОВ ИОННО-ЛУЧЕВЫМ И МАГНЕТРОННЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ 521

- 16.1. Особенности металлизации полимеров 521
- 16.2. Металлизация полимеров ионно-лучевым и магнетронным распылением 525
- 16.3. Металлизация полимеров небалансным магнетронным распылением и ионным покрытием 528
- 16.4. Исследование процессов нанесения покрытий на полимерные подложки ионно-лучевым распылением 531

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 535

ЛИТЕРАТУРА 536

TABLE OF CONTENTS

INTRODUCTION	13
Chapter 1. DESIGNS AND BASIC REQUIREMENTS TO CONTACT CONNECTIONS	16
1.1. Classification of methods of interconnections formation in electronics products	16
1.2. Constructional soldering connections and the requirements showed to them	21
1.3. Assembly soldering connections and their adaptability to manufacture	24
1.4. Evolution of contact connections in electronics products	27
Chapter 2. The BASIC AND AUXILIARY MATERIALS FOR FORMATION OF SOLDERING CONNECTIONS	37
2.1. Solders and special alloys	37
2.2. Metallurgy of solders and their dependence of properties on presence of impurity	44
2.3. Fluxes for the soldering	48
2.4. Soldering pastes for products of electronics	52
2.5. Inert and regenerative gases	56
2.6. Inert and regenerative gases	59
2.7. Materials for clearing connections	62
Chapter 3. MATERIALS OF CONNECTIONS AND ESTIMATION THEIR SOLDERABILITY	65
3.1. The basic materials of connections in electronics products	65
3.2. Estimation methods of solderability materials	68
3.3. Definition solderability by immersing in melts	72
3.4. Methods of an estimation solderability on capillary penetration and on the spread area of solder	76
3.5. Methods of an estimation solderability on wetting time	84
3.6. Solderability of galvanic plating	87
3.7. Solderability of electronic components	92
Chapter 4. PREPARATORY AND FINAL OPERATIONS AT CONNECTIONS SOLDERING	95
4.1. Surfaces tinning of connected details	95
4.2. Flux deposit methods at connections soldering	100
4.3. Batching of solder preparations at soldering	105
4.4. Restriction of the solder spread area	109
4.5. Clearing methods of flux rests	112
Chapter 5. METHODS AND EQUIPMENT FOR HEATING	117

5.1. Classification of heating methods and their comparative efficiency for the connections soldering	117
5.2. The equipment and the tool for heating by heat conductivity	122
5.3. Convection sources of heating	127
5.4. Heating methods of by the concentrated radiation streams	129
Chapter 6. CONSTRUCTIONAL CONNECTIONS SOLDERING TECHNOLOGY	148
6.1. Soldering of wave guides and MICROWAVE paths elements	148
6.2. Installation of microplates in microblocks cases	150
6.3. Hermetic sealing by the soldering of microblocks cases	160
Chapter 7. ASSEMBLY SOLDERING TECHNOLOGY OF ELECTRONICS PRODUCTS	165
7.1. Soldering and dismantle with the help of soldering iron and stations	165
7.2. The soldering of elements in plated-through hole	175
7.3. The soldering of elements with planar conclusions	185
7.4. SMT soldering methods	190
Chapter 8. ULTRASONIC SOLDERING AND MATERIALS METALLIZATION	197
8.1. Physical models of ultrasonic field energy influence on melts	197
8.2. Modeling of ultrasonic energy dynamic influence on melts	207
8.3. Removal oxide films and intensification of wetting process	216
8.4. Diffusion and chemical interaction melts with soldering materials	231
8.5. Modeling of diffusion processes in ultrasonic fields	242
8.6. Equipment and tools for ultrasonic soldering and metallization	257
8.7. Ultrasonic processes parameters influence on durable and electric properties of connections	282
Chapter 9. HIGH-FREQUENCY CONNECTIONS SOLDERING	305
9.1. High-frequency heating features, a choice of heating frequency	305
9.2. Methods and devices of high-frequency heating	309
9.3. Modeling and optimization of parameters HF heating	321
9.4. The equipment for high-frequency heating	331
9.5. Technology HF the constructional and assembly soldering	339
Chapter 10. The INFRA-RED AND LASER CONNECTIONS SOLDERING	354
10.1. Features of heating by infra-red and laser radiation	354
10.2. The equipment and processes of infra-red connection soldering	363
10.3. Optimization IR heating temperature structures	376
10.4. The equipment and processes of laser connections soldering	384

Chapter 11. CONNECTIONS FORMATION IN VACUUM AT INFLUENCE OF ELECTRONIC AND IONIC BEAMS	403
11.1. Interaction processes of electronic and ionic beams with soldering materials	403
11.2. Processes of the ionic - beam soldering and tinning	407
11.3. Processes of the electron beam connections soldering	412
Chapter 12. CONNECTIONS SOLDERING IN MICROELECTRONICS	415
12.1. Installation of crystals of semi-conductor devices on eutectic	415
12.2. The automated installation of crystals by the vibrating soldering	423
12.3. Installation of crystals of transistors in case D-PAK and IGBT	430
12.4. Pb free solder compositions for crystals installation	438
12.5. The soldering high-temperature superconductivity materials	447
Chapter 13. CONNECTIONS QUALITY ASSURANCE	449
12.1. Quality monitoring of connections	449
12.2. Electric and physic mechanical parameters control of solder connections	456
12.3. Quality monitoring of latent defects of connections	462
12.4. Reliability solder connections	472
Chapter 14. APPLICATION OF IONIC BEAMS FOR FORMATION AND PARAMETERS MANagements OF BORDERS « METAL - ARSENIDE OF GALLIUM»	481
14.1. Ionic-beam contacts synthesis to barrier Schottky on gallium arsenate	481
14.2. Research of streams characteristics of neutral and charged particles at ionic - beam dispersion	483
14.3. Research of issue spectra of plasma radiation at metal dispersion	487
14.4. Influence modes of ionic - beam dispersion contacts characteristics to barrier Schottky on gallium arsenate	488
14.5. Influence ionic clearing of gallium arsenate surface and ionic bombardment of a growing film on contacts characteristics to barrier Schottky	491
Chapter 15. FORMATION OF CURRENT-CARRYING COVERINGS ON SURFACES WITH DIAMONDLIKE STRUCTURE IONIC - BEAM AND MAGNETRON DISPERSION	499
15.1. Properties of the coverings received ionic - beam and magnetron dispersion	499

15.2. Formation of coverings on surfaces with diamond like structure an ionic method	505
15.3. Properties of thin-film coverings and parameters of unit borders at not balancing magnetron dispersion	510
15.4. Formation of coverings by ionic - beam dispersion in a mode ionic - stream focus	514
15.5. Research of parameters of the diamond heat-conducting paths metalized with application of developed technology	518

Chapter 16. METALLIZATION OF POLYMERS IONIC BEAM AND MAGNETRON DISPERSION - 521

16.1. Features of polymers metallization	521
16.2. Metallization of polymers by an ionic method	525
16.3. Metallization of polymers not balancing magnetron dispersion	528
16.4 Research of coverings drawing processes on polymeric substrates ionic - beam dispersion in a mode ionic - stream focus	531

CONCLUSION 535

LITERATURE 536

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы формирования паяных соединений в технологии изделий электроники (ИЭ) имеют особую актуальность по целому ряду причин. Операции сборки и монтажа являются до сих пор самыми трудоемкими при изготовлении ИЭ и занимают до 50-70 % общей трудоемкости изготовления изделий. Микроминиатюризация элементов и создание функционально сложных микроэлектронных устройств, в частности сверхбольших интегральных микросхем (СБИС) и микропроцессоров вызвала особые проблемы в области микромонтажа ИЭ. Согласно закону Г. Мура число транзисторов на кристалле удваивается каждые два года и их плотность к 2008 г. достигнет 45 млн. на см² [1]. Высокую функциональную сложность и степень интеграции невозможно реализовать без принципиального совершенствования системы контактных соединений, так как согласно правилу Рента число сигнальных выводов изделия определяется как $n=4,5 m^{0,4}$, где m – число вентилях в кристалле. Разработка микропроцессоров с рабочей частотой сигнала до 3,5 ГГц увеличивает число выводов до 1000 [2].

Освоение электронных сборок V поколения - многокристалльных модулей (МКМ) – тонкопленочных многослойных гибридных конструкций, выполненных на керамических, кремниевых или металлических подложках, к которым бескорпусные кристаллы присоединяются методами сварки или пайки, повысило плотность монтажных соединений до 200 на см² [3]. Традиционные процессы монтажа не обеспечивают необходимой в настоящее время высокой производительности и высокого процента выхода годных изделий с плотным монтажом. Статистические данные показывают, что 50–80 % всех отказов в ИЭ происходит вследствие дефектов соединений, причем стоимость обнаружения и исправления отказа на этапе сборки блока обходится в 100 раз дешевле, чем при испытаниях аппаратуры [4].

Переход на бессвинцовистые припои при монтаже ИЭ ставит ряд задач по обеспечению хорошей смачиваемости поверхностей, оптимизации температурных профилей нагрева, контролю качества соединений. С повышением функциональной сложности ИЭ растут проблемы их демонтажа с поверхности плат, в особенности многовыводных корпусов BGA, контактируемых с помощью шариковых выводов [5].

Повышение производительности труда, качества и надежности соединений может быть достигнуто за счет широкого внедрения автоматизированного оборудования с микропроцессорным

управлением, использования концентрированных потоков энергии электромагнитного поля, включая высокочастотное, инфракрасное, лазерное излучение, разработки новых материалов для формирования контактных соединений.

Одной из проблем использования методов активации является недостаточная изученность механизмов воздействия концентрированных потоков энергии ультразвукового (УЗ) и электромагнитного (ЭМ) полей на расплавы и электронные компоненты. Большой вклад в разработку технологии и физических основ ультразвуковой активации внесен научными школами, возглавляемыми Коноваловым Е.Г., Северденко В.П., Степаненко А.В., Клубовичем В.В., Колешко В.М., Прохоренко П.П. Разработке физических основ воздействия мощного ультразвука на межфазную поверхность металлов и сплавов посвящены работы О.В. Абрамова, Б.А. Аграната, И.С. Пугачева, Г.И. Эскина, А.В. Кулемина. Применение этих исследований позволяет повысить качество соединений за счет улучшения их структуры, обеспечить предпосылки формирования соединений из разнородных материалов. Значительный вклад в разработку физических основ ультразвуковой активации процессов формирования контактных соединений внесен зарубежными учеными: Н.Н. Manko, R.J. Klein Wassink, С.Ј. Thwaites, A. Lystrup. Вместе с тем сдерживающим фактором, определяющим масштабы их использования, является недостаточная изученность механизмов совместной активации воздействием энергией УЗ и ЭМ полей применительно к ИЭ.

Особенностями процессов формирования контактных соединений в ИЭ являются: широкая номенклатура используемых электронных компонентов, интегральных микросхем, микросборок; различные виды макросоединений дискретных электронных компонентов на печатных, двусторонних и многослойных платах; микросоединений на подложках, микроплатах, в многокристалльных модулях; разнообразные по физической природе источники теплового излучения: потоки расплавленного припоя, нагретый инструмент, концентрированные потоки энергии различных полей. Для реализации высокоэффективных технологических процессов формирования соединений и управления ими в реальном масштабе времени необходимо современное программно-управляемое оборудование, сочетающее возможность компьютерного управления с гибкой переналадкой производства. Обеспечение высокого качества ИЭ в условиях автоматизированного производства невозможно без разработки достоверных математических моделей, описывающих

процессы формирования соединений с применением активирующих факторов.

Методы нанесения токопроводящих тонкопленочных покрытий с использованием ионных пучков весьма перспективны, т.к. можно легко варьировать их энергию, плотность тока и формировать границы раздела "тонкопленочное покрытие - твердое тело" с высокой адгезией и воспроизводимостью. Характеристики границы раздела оказывают определяющее влияние на электрофизические параметры систем "металл-полупроводник" и "диэлектрик-полупроводник" в производстве ИЭ на основе сложных полупроводников, в частности на арсениде галлия. С другой стороны, разработка и производство мощных микропроцессоров, транзисторов, лазерных диодов и других изделий силовой электроники требует эффективного отвода тепла. Решением этой проблемы является применение алмазных теплоотводов. Металлизация их поверхности токопроводящими покрытиями с высокими электрофизическими характеристиками и с высокой адгезией к алмазу является актуальной задачей. Широкое использование различных полимеров для изготовления ИЭ и оптики (гибкие дисплеи, электронная бумага, клавиатура, корпусные изделия и т.п.) предполагают нанесение на их поверхность токопроводящих покрытий.

Таким образом, для получения качественных и стабильных контактных соединений в ИЭ необходимо решение комплекса взаимосвязанных проблем, связанных с разработкой математических моделей и технологических основ новых активированных процессов формирования контактных соединений, теоретическое и экспериментальное исследование механизмов их формирования, создание оборудования на основе совместного применения концентрированных потоков энергии различных полей, что обеспечит существенное повышение качества изделий, экономию материалов и снижение энергопотребления.

Решению названных актуальных для науки и практики задач и посвящена настоящая работа.

Глава 1. КОНСТРУКЦИИ И ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К КОНТАКТНЫМ СОЕДИНЕНИЯМ

1.1. Классификация методов формирования соединений в изделиях электроники

При монтаже электронной аппаратуры применяют как методы непосредственного соединения контактируемых материалов, осуществляемые под воздействием давления (накрутка, обжатие), тепла и давления (сварка), давления и физического воздействия (УЗ сварка), так и методы с использованием промежуточного материала в виде припоя (пайка), токопроводящего клея под действием давления, тепла и физических методов активации (рис. 1.1).

Паяные соединения нашли самое широкое применение при монтаже изделий электроники вследствие следующих достоинств: низкого и стабильного электрического сопротивления, широкой номенклатуры соединяемых металлов, легкости автоматизации, контроля и ремонта. Процессы пайки легкоплавкими припоями широко используются при монтаже печатных плат и проводных плат, герметизации корпусов полупроводниковых приборов и гибридных ИМС, сборки керамических конденсаторов, поверхностно монтируемых элементов. Недостатки паяных соединений связаны с высокой стоимостью используемых цветных металлов, необходимостью удаления остатков флюса, низкой термостойкостью, снижением прочности в результате термического старения.

Сварные электрические соединения по сравнению с паяными имеют следующие преимущества: более высокую механическую прочность, отсутствие присадочного материала, меньшую площадь контакта. К недостаткам следует отнести: критичность при выборе сочетаний материалов, увеличение переходного сопротивления из-за образования интерметаллидов, сложность группового контактирования и ремонта.

Наибольшее применение при электрическом проволочном монтаже получили ультразвуковая и термокомпрессионная микросварки, а также сварка расщепленным электродом. Структура образующихся сварных соединений зависит от технологических факторов: температуры, давления, а также от качества подготовки поверхности. Автоматические сварочные установки обеспечивают высокую производительность контактирования (от 12500 и выше соединений в час).

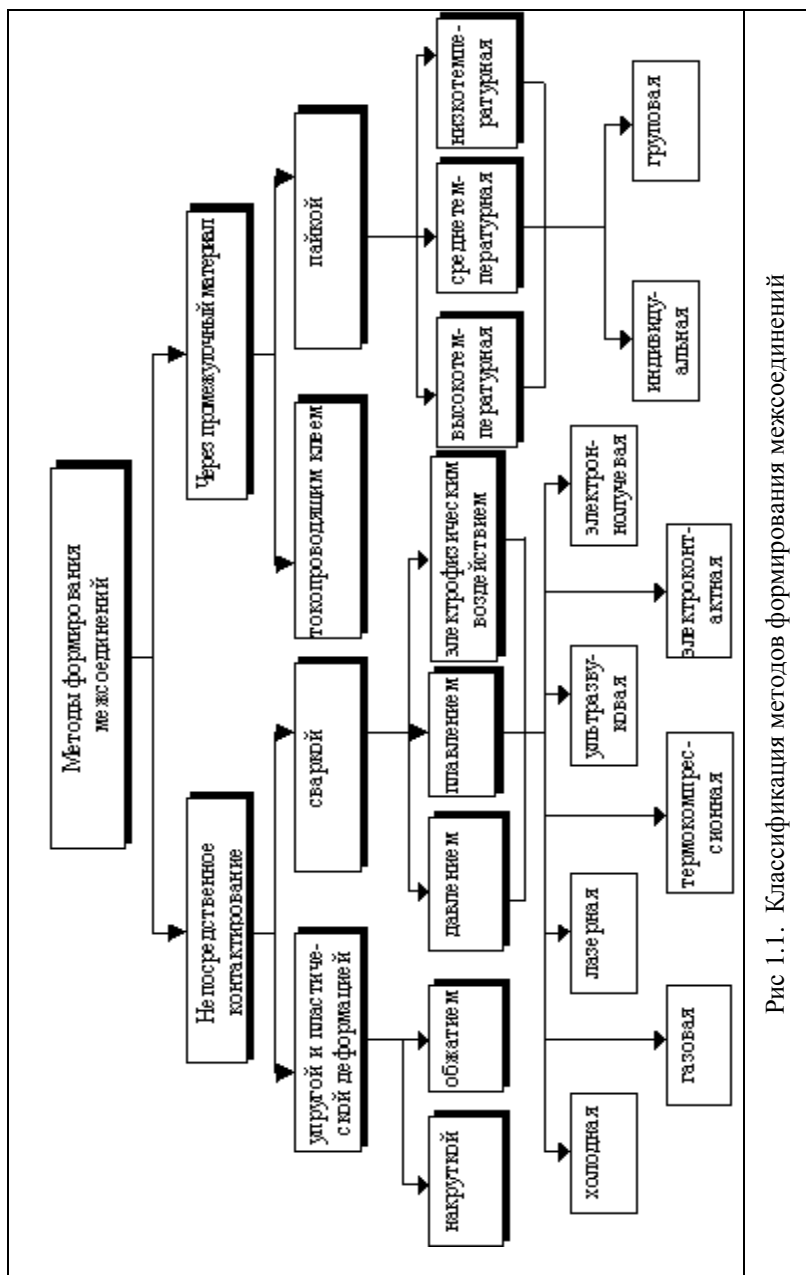


Рис 1.1. Классификация методов формирования межсоединений

Контактные соединения, основанные на пластической деформации соединяемых элементов в холодном состоянии - накруткой и обжимкой, характеризуются высокой механической прочностью, низким переходным электрическим сопротивлением, легкостью механизации, экономичностью и надежностью при эксплуатации. Недостатками являются: необходимость специальных контактирующих элементов, увеличенная площадь контакта.

Контактирование токопроводящими клеями в отличие от пайки и сварки производится при более низких температурах и не вызывает изменения структуры соединяемых материалов. Однако этот метод характеризуется высоким электрическим сопротивлением контакта, низкой термостойкостью и невысокой надежностью соединений. Параметры различных соединений приведены в табл. 1.1 [6].

Таблица 1.1.

Параметры соединений в изделиях электроники

Вид соединения	Переходное сопротивление, мОм	Прочность, МПа	Интенсивность отказов, 10^{-9} 1/час	Тепловое сопротивление, град/Вт
Сварка	0, 01–1	100–500	0, 1–0, 2	0, 001
Накрутка	1–2	60–80	0, 2–0, 5	0, 0005
Пайка	2–5	10–50	1–10	0, 002
Обжатие	1–10	20–50	2–5	0, 001
Клеевое	$(1–10) \cdot 10^3$	5–10	25–50	0,5–5,0

Анализ данных табл.1.1, показывает, что для сварных соединений характерен значительный разброс по величине переходного сопротивления в зависимости от метода получения. Соединения накруткой стабильны по электрическим и механическим свойствам. Механическая прочность и надежность паяных соединений зависят от технологических параметров процесса и конструкции соединений.

Контактные монтажные соединения в электронной аппаратуре должны обладать: минимальным электрическим переходным сопротивлением, высокой механической прочностью, стабильностью электрических и механических параметров во времени, высокой надежностью и долговечностью в заданных условиях эксплуатации, экономичностью и высокой производительностью процесса монтажа, легкостью и достоверностью контроля качества.

Низкое электрическое переходное сопротивление и высокая механическая прочность соединений достигаются при объединении контактируемых металлов за счет металлической связи, при этом необходимо атомы металлов сблизить до межатомных расстояний, т.е.

до размеров 10 нм и ввести энергию в зону контакта. Серьезным препятствием для контактирования являются жировые пленки и химические окислы на поверхности контактируемых металлов. Удаление этих пленок химическими методами (флюсованием, обезжириванием) или физическими (ультразвуком, плазменной очисткой) является неотъемлемой частью процесса образования токопроводящих контактных соединений.

Наиболее важным показателем токопроводящих контактных соединений является переходное электрическое (контактное) сопротивление. Если сравнить падение напряжения в 3-х случаях: в сплошном проводнике на участке АВ, в зоне контакта двух соединенных непосредственно друг с другом материалов и в зоне контакта через промежуточный материал (рис.1.2), то окажется, что оно будет различным.

Для проводника электрическое сопротивление постоянному току R_v определяется на основании известного закона Ома; для двух соединенных металлических проводников одинакового сечения и материала электрическое сопротивление контакта R_k равно:

$$R_k = R_v + R_{nep}, \quad (1.1)$$

где R_{nep} — переходное электрическое сопротивление.

В этом случае гомогенную связь между материалами нарушают различные поверхностные неровности и оксидные пленки в месте контакта, и переходное сопротивление складывается из сопротивления оксидных пленок R_n и сопротивления сужения R_c [7]:

$$R_{nep} = R_n + R_c. \quad (1.2)$$

Сопротивление сужения возникает вследствие неровности поверхности контакта, возникновения дефектов в зоне контакта и стягивание линий тока:

$$R_c = \rho L / S_k, \quad (1.3)$$

где S_k - площадь поверхности контактирования, ρ - удельное сопротивление, L -длина участка сужения.

Сопротивление оксидных пленок можно определить как:

$$R_n = \rho_n h / S_k, \quad (1.4)$$

где ρ_n - удельное сопротивление поверхностных пленок, h - толщина пленок.

Для соединения через промежуточный материал контактное сопротивление складывается из следующих составляющих:

$$R_k = R_v + 2R_{nep} + R_m, \quad (1.5)$$

где R_m - электрическое сопротивление слоя промежуточного материала.

Поскольку отношение удельных электрических сопротивлений оловянно-свинцовых припоев и медного проводника составляет:

$$\delta = \rho_{np}/\rho_m = 8-10, \quad (1.6)$$

то контактное сопротивление паяного соединения выше, чем соединения с непосредственным контактированием. С учетом этого расчет паяного соединения на токовую нагрузку проводится в наиболее тяжелом варианте, т.е. считается, что весь ток протекает через припой.

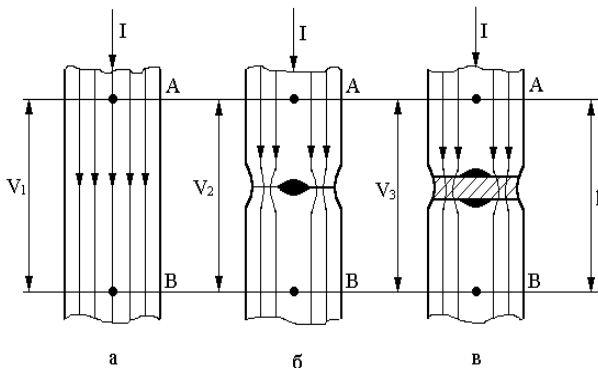


Рис. 1.2. Схема измерения падения напряжения в зоне контакта:
 а - сплошной проводник, б - непосредственный контакт,
 в - соединение через промежуточный материал

Для круглых деталей, соединяемых встык при $D_2 > D_1$ (рис. 1.3), диаметр припоя в соединении рассчитывают как [8]:

$$D_{np} = \sqrt{\delta} \cdot D_1, \quad (1.7)$$

где D_1 - диаметр соединяемого проводника.

Расчет механической прочности паяного соединения выполняют по сечению наиболее "слабой" детали. В паяном соединении такое сечение проходит по припою. Механическая прочность P определяется соотношением:

$$P = \sigma_s \cdot S_{np}, \quad (1.8)$$

где σ_s - предел прочности припоя при растяжении (для ПОС61 40 МПа), S_{np} - поперечное сечение припоя, для нахлесточного соединения равно $L_{np}b$, где b - ширина нахлеста.

1.2. Конструкционные паяные соединения и требования, предъявляемые к ним

Конструкционные паяные соединения выполняют низко-, средне- и высокотемпературными припоями. Низко- и среднетемпературная пайка применяется в производстве прецизионных паяных соединений, так как уменьшение нагрева существенно снижает деформацию деталей, а высокотемпературная — при изготовлении крупногабаритных конструкций, обладающих высокой механической прочностью и термической стойкостью.

Технологический процесс конструкционной пайки аналогичен процессу выполнения монтажной, меняются только типы паяных соединений и повышаются требования к жесткости фиксации деталей перед выполнением соединения. Наибольшей механической прочностью обладают соединения внахлестку и встык с накладкой, а повышенной точностью — ступенчатое (рис.1.3). Для крепления деталей применяют штифтовое соединение, прихватку сваркой, развальцовку, отбортовку, точечное обжатие, кернение, специальные конструктивные элементы (гнезда, уступы, буртики) и т. д. Поступающие на сборку детали должны удовлетворять требованиям технологичности и иметь в закрытых объемах отверстия диаметром 0,5–1,5 мм для выхода воздуха и газов в процессе пайки, технологические припуски 1–2 мм на длину во фланцевых соединениях для улучшения условий формирования галтели, покрытия с хорошей паяемостью.

Пайку конструктивных соединений выполняют в поле токов высокой частоты, в печи или в ванне с расплавленной солью. Паяные соединения должны обладать высокой электропроводностью и постоянным переходным электрическим сопротивлением в заданных условиях эксплуатации. В конструкторской документации на модули и блоки аппаратуры требование переходного сопротивления к паяным соединениям должно выражаться в численных значениях, заданных разработчиком при проектировании изделия. При его изготовлении это значение переходного сопротивления будет одним из основных критериев объективной оценки качества паяных соединений.

Вторым по значимости является требование достаточной механической прочности, которая в зависимости от эксплуатационных нагрузок должна устанавливаться расчетным путем по сопротивлению отрыву. При конструировании паяного соединения учитывают, что предел прочности паяного шва должен быть равен пределу прочности наиболее слабого элемента конструкции [9]:

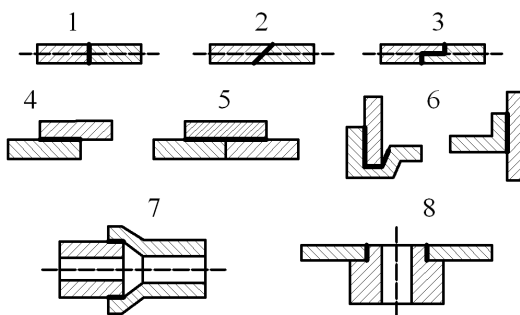


Рис. 1.3. Типы конструктивных паяных соединений: 1 - встык, 2 – в скос, 3 - ступенчатое, 4 -внахлест, 5 - встык с накладкой, 6 - в замок, 7 - телескопическое, 8 - труба с фланцем

$$\sigma_{np} S_{np} = \sigma_m S_m, \quad (1.9)$$

где σ_{np} , σ_m – пределы прочности припоя и материала; S_{np} , S_m – площади сечения припоя и материала.

Отношение σ_m / σ_{np} , называемое коэффициентом прочности β , в большинстве случаев больше единицы, поэтому рабочее сечение паяного шва должно быть в несколько раз больше сечения основного материала. Напряжения среза и растяжения могут быть вызваны нагрузками, направленными по касательной к паяному соединению. Величина нахлестки определяется из уравнения (1.9). В случае плоских образцов $aL_j = \beta aH$, $L_j = \beta H$. Для цилиндрических стержней ширина паяного соединения должна по крайней мере равна радиусу стержня меньшего диаметра или превышать его:

$$\frac{D_B}{2} L_j = \beta \frac{\pi}{4} D_B^2, \quad L_j = \frac{\pi}{2} \beta D_B. \quad (1.10)$$

Для паяного соединения из двух элементов прямоугольного сечения, учитывая, что паяный шов – наиболее слабый элемент, получаем, что прочность $F_1 = \sigma_m aH$, а для круглых деталей $F_2 = \pi \sigma_m D_B^2 / 4$.

Механическая прочность прямого шва в соединении встык:

$$F_n = \sigma_B \cdot h \cdot b, \quad (1.11)$$

где h – высота, b – ширина.

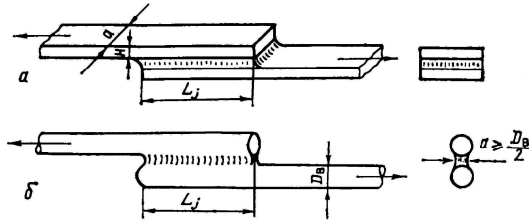


Рис. 1.4. Соединение внахлестку листового материала (а) и цилиндрического стержня (б)

В случае косого шва прочность соединения более высокая:

$$F_K = \sigma_{cp} \cdot \frac{h}{\cos \alpha} \cdot b, \quad (1.12)$$

где α - угол скоса.

Повышенную точность сборки и высокую прочность имеет ступенчатый шов, отдельные элементы которого работают при разрыве на растяжение, а другие – на срез:

$$F_C = \sigma_{cp} \cdot L \cdot b + \sigma_B (h_1 + h_2) \cdot b. \quad (1.13)$$

Для соединения внахлест прочность определяется площадью нахлестки:

$$F_H = \sigma_{cp} \cdot L \cdot b, \quad (1.14)$$

где L – длина нахлестки.

Соединение с накладкой позволяет увеличить прочность шва:

$$F_{H1} = \sigma_{cp} \cdot L \cdot b + \sigma_B \cdot h_1 \cdot b_1. \quad (1.15)$$

Прочность таврового соединения:

$$F_T = \sigma_{cp} \cdot I \cdot H, \quad (1.16)$$

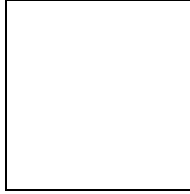
где I – момент инерции, H – толщина.

Прочность телескопического соединения:

$$F_{тел} = \sigma_{cp} \cdot 2\pi R \cdot L, \quad (1.17)$$

где R – радиус охватываемого элемента.

В конструкции паяных соединений между поверхностями сопрягаемых монтажных элементов должны предусматриваться оптимальные зазоры, определяемые составом выбранного припоя и особенностями процесса пайки. Оптимальный зазор при пайке в отверстия оловянно-свинцовыми припоями равен [10]:



(1.18)

где d_0 , d_6 – диаметры металлизированного отверстия и вывода компонента.

Фактически зазоры выполняются превышающими 0,4 мм; при этом не учитывается, что удельное электросопротивление оловянно-свинцовых припоев почти в 10 раз больше, чем у меди. С увеличением зазоров возрастает переходное сопротивление паяных соединений и расход дефицитных высокооловянных припоев, снижается механическая прочность, растет число усадочных раковин и увеличиваются затраты ручного труда на устранение дефектов. Эти факторы, а также смачивание и капиллярное заполнение зазоров припоями должны приниматься в расчет при оптимизации зазоров.

1.3. Монтажные паяные соединения и их технологичность для производства

Электромонтажные соединения должны проектироваться с обеспечением возможности визуального контроля паяного шва на всем его протяжении. Для печатного монтажа с металлизированными отверстиями галтели шва каждого из паяных соединений располагаются с обеих сторон печатной платы, и требование свободного доступа для двустороннего их осмотра приобретает важное значение. Невыполнение этого требования на этапе проектирования узлов ведет к производству заведомо ненадежных в эксплуатации изделий, ибо не позволяет обнаружить дефектные соединения и произвести их ремонт.

Паяные швы электромонтажных соединений должны быть без избытка припоя, иметь преимущественно скелетную форму с вогнутыми и непрерывными галтелями припоя по всему периметру соединения (рис 1.5). Скелетная форма в отличие от заливной позволяет видеть контуры паяных соединений и с большей достоверностью оценивать качество монтажных соединений при их визуальном контроле.

Соединение пустотелых заклепок, лепестков, стоек их подобных конструктивных деталей с контактными площадками или печатными проводниками, выполненные методом развальцовки или расклепки,

должны быть пропаяны по всему периметру развальцовки или расклейки. Поверхность галтелей припоя швов должны быть гладкой, глянцевой или светло-матовой без темных пятен, трещин, крупных пор, скопления мелких газовых и усадочных раковин, грубой зернистости, без игольчатых и дендритных образований, наплывов, брызг и выступов припоя, уменьшающих минимально допустимое расстояние между соединениями контактными площадками и печатными проводниками.

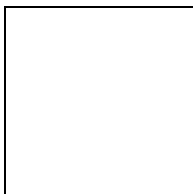


Рис. 1.5. Конструктивные формы паяных монтажных соединений: заливная (а), скелетная (б), в металлизированное отверстие (в), на контактной площадке (г)

Конструкция паяных электромонтажных соединений при любой компоновке и вариантах установки электронных компонентов на печатные платы должны обладать высокой ремонтопригодностью. Паяные соединения в отличие от сварных и контрольных наиболее полно удовлетворяют этому требованию и обеспечивают быструю и неоднократную взаимозаменяемость компонентов без повреждения их выводов и элементов печатного монтажа. Однако высокая ремонтопригодность паяных соединений может не реализоваться из-за просчетов, допускаемых при компоновке и выборе конструктивных вариантов установки компонентов на печатные платы, или из-за стремления любой ценой обеспечить высокую плотность монтажа.

Повышение производительности труда, качества и надежности паяных соединений может быть достигнуто за счет широкого внедрения механизированных и автоматизированных технологических процессов пайки. Однако возможности механизированной технологии используются далеко не полно из-за несовершенства конструкции монтажных элементов, печатных плат и соединений, подлежащих пайке. Необходимость повышения технологичности их конструкции вызывается специфическими требованиями групповых технологических процессов пайки и следующих за ней операций. Основные требования, которые механизированная групповая пайка предъявляет к конструкции деталей, поступающих на сборку, состоят в следующем.

Металлопокрытия на монтажных элементах, печатных платах и конструкционных деталях, входящих в собираемые изделия, должны обладать высокой паяемостью при пайке оловянно-свинцовыми припоями с применением спирто-канифольных флюсов, не вызывающих коррозии. Состав и свойства применяемых для металлопокрытий металлов должны исключать возможность растворения их в оловянно-свинцовых припоях и не образовывать с этими припоями интерметаллических соединений. Металлопокрытия на монтажных элементах должны сохранять паяемость в течение всего установленного срока складского хранения.

Лакокрасочные материалы для маркировки компонентов должны быть стойкими к воздействию флюсующих веществ, а также спирто-бензиновых смесей, трихлорэтилена и других растворителей, применяемых для отмывки остатков флюсов.

Для обеспечения высокой паяемости необходимо, прежде всего, взамен применяемого многообразия металлов и сплавов, а именно меди, золота, серебра, оловянно-висмутовых, оловянно-свинцовых и никелевых сплавов, использовать для металлопокрытий оловянно-свинцовые припои марок ПОССу 50-0,5, ПОССу 61-0,5 или ПОС 61 и взамен широко применяемых электролитических и химических методов наносить эти металлопокрытия лужением. Целесообразность такой замены и последующей стандартизации применяемых металлов и методов металлопокрытий подтверждается производственным опытом и лабораторными исследованиями. Установлено, что все покрытия, нанесенные электролитическими методами, включая меднение, серебрение и золочение, отличаются значительной пористостью и гигроскопичностью, которая вызывается наличием в порах коррозионно-активных остатков электролитов. По паяемости и срокам его хранения все эти покрытия значительно уступают монолитным беспористым оловянно-свинцовым покрытиям, нанесенным методом лужения. Кроме того, металлопокрытия, полученные электролитическим осаждением, имеют удельное сопротивление, в несколько раз больше, чем у исходных металлов и сплавов.

Резкое снижение или полная потеря паяемости через 15–30 дней складского хранения у серебряных покрытий, обусловлена чувствительностью их к воздействию сернистых соединений, всегда присутствующих в различных концентрациях в воздушной среде промышленных предприятий. Характерным недостатком покрытий драгоценными металлами является интенсивная растворимость серебра и олова в жидком олове. Пайка монтажных элементов, покрытых

драгоценными металлами, с применением обычных оловянно–содержащих припоев сопровождается высокой скоростью химической реакции между оловом и серебром или золотом с образованием хрупких Ag_2Sn_2 , Ag_2Sn или AuSn , AuSn_2 , AuSn_2 , которые снижают механическую прочность и электропроводность соединений.

Опасность появления золото–оловянных интерметаллидов устраняют за счет удаления золотого покрытия с монтажных элементов перед их пайкой или применением при пайке безоловянных специальных припоев, содержащих золото, индий, серебро или свинец. Проблема повышения в 4–6 раз сроков сохранения паяемости металлопокрытий на выводах компонентов может быть решена повышением качества припоя, улучшением условий хранения, в том числе герметизацией упаковочной тары, или консервацией металлопокрытий на стадии изготовления компонентов флюсами покрытиями. Один из путей совершенствования технологии конструкции изделий при их отмывке состоит в устранении существующего многообразия используемых для маркировки лакокрасочных составов, в защите маркировки прозрачными покрытиями, стойкими к воздействию флюсов и растворителей, применяемых при групповых механизированных процессах флюсования и отмывки остатков флюсов.

1.4. Эволюция контактных соединений в изделиях электроники

В изделиях электроники второго и третьего поколений радиоэлементы с осевыми выводами: резисторы типа МЛТ, конденсаторы типа КМ и др., а также ИМС в прямоугольных корпусах типа 2, в круглых типа 3, например 201.14- и 201.16-, 248.42-, зарубежные ИМС в аналогичных корпусах DIP с шагом выводов 2, 5 мм монтировались в отверстия плат. Для обеспечения надежности паяных соединений с осевыми и штыревыми выводами необходимо обеспечить оптимальный зазор в конструкции между поверхностями элементов.

В зависимости от конструкции печатной платы монтажное соединение может быть с неполным и полным заполнением припоем. В первом случае – меньшая механическая прочность соединения, возможность отслоения контактных площадок. Во втором случае требуется рациональный выбор зазора и большее время пайки, а также обеспечение паяемости металлизированного отверстия.

Для электронных сборок, использующих компоненты с осевыми выводами и ИМС со штыревыми выводами в корпусах типа DIP,

монтируемыми в отверстия печатных плат или металлизированные отверстия ДПП и МПП (рис. 1.6,а) используют способы пайки погружением, когда собранная плата опускается в расплавленный припой. Монтаж элементов с планарными выводами требует точного совмещения вывода с площадкой (фиксация элемента) в течение короткого времени пайки. В частности, корпуса ИМС типа 4 (401.14-, 402.16-, 405.24-, 429.42- и другие) и аналогичный корпусу 401.14-зарубежный корпус "FLAT-Package" с шагом выводов 1, 25 мм и ряд типов перспективных корпусов с повышенным (84 и более) числом выводов, размещаемых по всему периметру корпуса с шагом 1, 25; 1, 0; 0, 625 и даже 0,5 мм, а также различные сборки (резисторные, конденсаторные типов Б18, Б19 и др. (рис.1.6 , б).

Бескорпусные ИМС с проволочными и объемными выводами монтируются на контактные площадки платы микросваркой или пайкой (рис. 1.6,в). Автоматизированный монтаж кристаллов на гибких полимерных носителях выполняют групповой пайкой для медных выводов или сваркой алюминиевых выводов (рис.1.6, г).

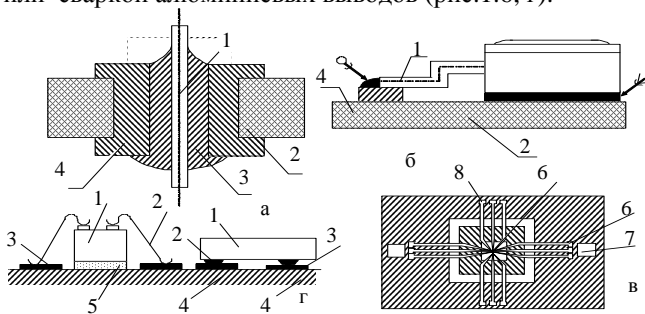


Рис.1.6. Конструктивные типы монтажных соединений

Поверхностный монтаж (SMT) как конструктивно-технологическое направление для миниатюризации электронной аппаратуры четвертого поколения получил развитие в 80-е годы. Эта технология позволила уменьшить габариты конструкции, снизить расход материалов, а малая масса компонентов уменьшает их восприимчивость к воздействиям вибрации, что особенно важно для надежной работы аппаратуры. Уменьшение длины выводов и соответствующее снижение паразитных индуктивностей, емкостей и сопротивлений приводит к улучшению электрических параметров и увеличению надежности аппаратуры.

Увеличение производительности компьютерной техники и средств цифровой связи наряду с увеличением быстродействия элементной базы находится в непосредственной зависимости от сокращения длины связей между логическими элементами, так называемой конструктивной задержки передаваемого сигнала. Если сопоставить значение времени переключения логических элементов, не превышающее в современных БИС единиц наносекунд, со временем распространения сигнала в печатных проводниках (6–7 нс/м), то, очевидно, что главной составляющей временных задержек в изделиях электроники являются задержки в межсоединениях. Повышение быстродействия должно сопровождаться максимально возможным снижением этих задержек, что достигается повышением степени интеграции логических элементов, более плотной компоновкой микросхем на платах и сокращением длины связей.

Увеличение степени интеграции вызывает рост числа входных (выходных) контактов (выводов корпуса) микросхем n , подчиняющийся соотношению Рента [11]:

$$n = kN^p, \quad (1.19)$$

где k — среднее число межсоединений, приходящееся на один логический элемент; N — количество логических элементов, p — показатель Рента, зависящий от структуры логических схем.

Например, в ИМС, для двухвходового вентиля $k = 3 \dots 4$, для производной логики высокопроизводительных процессоров $p = 0,5 \dots 0,75$, для микропроцессорной логики $p < 0,5$. Число соединений N_c определяется суммарным числом выводов n всех M микросхем, устанавливаемых на печатную плату:

$$N_c = k_p M n, \quad (1.20)$$

где k_p — коэффициент разветвления соединений, зависящий от числа нагрузок m в цепях межэлементных связей: $k_p = m/(m + 1)$, так что $0,5 < k_p < 1$.

Суммарная длина соединений в печатных платах $\sum l_c$ определяется числом соединений N_c и средней длиной одного соединения \bar{l}_c :

$$\sum l_c = N_c \bar{l}_c = k_u M n \bar{l}_c \quad (1.21)$$

где k_u — коэффициент использования монтажного поля платы выводами микросхем.

Статистические исследования показывают, что при произвольном размещении микросхем на плате средняя длина одного соединения определяется размером платы L и примерно составляет $\bar{l}_c = 2/3 L$. Положив $k_u = 0,5$ получим суммарную длину соединений:

$$\sum l_c = 1/3 MnL. \quad (1.22)$$

Отношения к площади платы L^2 суммарного числа выводов микросхем Mn и суммарной длины соединений $\sum l_c$ в ней представляют соответственно плотности монтажа и соединений:

$$P_M = k_u Mn / S_{nl}, \quad (1.23)$$

$$P_c = 1/3 k_u Mn / L. \quad (1.24)$$

Используя (1.23) и (1.24), получим соотношение между плотностями соединений и монтажа

$$P_c = 1/3 k_u P_M L. \quad (1.25)$$

Таким образом, увеличение плотности размещения монтажных элементов и уменьшение линейных размеров плат пропорционально увеличивает плотность соединений. С другой стороны, плотность соединений определяется плотностью трассировки, т. е. числом проводников n_{np} , прокладываемых между отверстиями и коэффициентом использования трасс η , а в МПП — еще и числом сигнальных слоев m_c :

$$P_c = (n_{np} + 1) \eta m_c / T, \quad (1.26)$$

где T — шаг сквозных отверстий, между которыми трассируется n_{np} проводников.

Для повышения плотности монтажа необходимо не только увеличивать плотность трассировки проводников, а гораздо эффективнее увеличивать количество межслойных соединений.

Технологические изменения в области сборки печатных плат, которые начались с пассивных компонентов, распространились и на ИМС. В результате перехода на поверхностный монтаж, в ближайшем будущем корпуса типа P-LCC и ТО, которые составляют около 90% всех продаж ТМО приборов, заменяются на P-DSO и SOT-23. Корпуса типа P-LCC заменяются на P-DSO при большом числе выводов и на P-QFP при их малом количестве. Основной причиной такой замены являются проблемы контроля паяных соединений выводов j-типа, расположенных под корпусами, а также большая площадь поверхности печатной платы, занимаемой корпусами P-LCC [12].

Прогрессирующая микроминиатюризация аппаратуры ведет к дальнейшему снижению размеров корпусов, которые становятся все меньше и тоньше. Сверхтонкие корпуса типа P-TSOP или P-TQFP со стандартным числом выводов, становятся реальной альтернативой большинству методов монтажа кристаллов с высокой плотностью, таким как TAB (Tape Automated Bonder), COB (Chip On Board) и монтажу методом перевернутого кристалла (Flip Chip).

Применение SMD корпусов у изготовителей аппаратуры связано с определенными трудностями, что является результатом снижения расстояния между выводами и увеличением их числа. Основной проблемой, сдерживающей широкое применение корпусов с шагом менее 0,3 мм, является миниатюрность выводов и необходимость облегчения их высокой копланарности. Отклонение от нормального положения хотя бы одного вывода приводит к отказу аппаратуры.

Одним из перспективных направлений в монтаже кристаллов являются технология TCP (Tape Carrier Package), при которой внутреннее соединение выполняется в качестве TAB. При использовании в качестве носителя кристалла фольгированной пленки и расстоянии между выводами до 0,3 мм, возможно получить результаты, аналогичные технологии штамповки, травления FeNi42 и применения медной рамки. Что касается места занимаемое на печатной плате, корпуса типа TCP сопоставимы по размерам с технологией Chip - On - Board (COB) и Flip Chip (рис. 1.7).

По сравнению с монтажом в отверстия, технология монтажа на поверхность создает в компонентах в процессе пайки более высокие термомеханические напряжения. При пайке оплавлением пластмассовых корпусов больших размеров, в результате испарения влаги, возможно возникновения эффекта «воздушной кукурузы», что может привести к появлению трещин как в корпусе, так и в кристалле.

Корпус BGA (Ball Grid Arrays) привлекает к себе пристальное внимание, поскольку обладает большими преимуществами. Изделия с BGA могут быть собраны на существующих SMD сборочных линиях, причем расстояние между выводами не представляет серьезной проблемы.

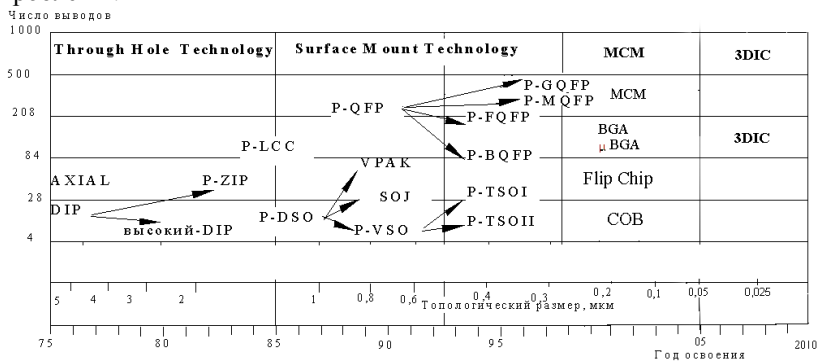


Рис. 1.7. Перспективы развития корпусов ИМС и технологий монтажа

В отличие от Ultra-Fine Pitch, паяные соединения в BGA расположены достаточно свободно, типичное расстояние 1,27 или 1,52 мм. Корпуса BGA имеют меньший размер контактных площадок по сравнению с QFP и занимают на 50% меньшую площадь на плате по сравнению с ними. В отличие от TAB, шариковые выводы в BGA до сборки полностью контролепригодны и не требуют специальной аппаратуры. Кроме того, BGA могут применяться для монтажа кристаллов с большим количеством выводов – 86, 119, 169, 225 и 357 [5]. Корпуса BGA могут быть сконструированы с меньшей длиной соединений, т. е. с меньшей индуктивностью выводов, имеют более высокую механическую резонансную частоту и рассеивает большую мощность по сравнению с QFP при прочих равных условиях.

Основной корпуса BGA является миниатюрная печатная плата или «lead frame» («выводная рамка»), изготавливаемая из эпоксидного стеклопластика (рис.1.8), который применяется вместо универсального FR4, поскольку имеет более высокую температуру стеклования (170–215°C) и теплостойкость (230°C в течение 30 мин без ухудшения параметров). Для изготовления печатной платы используют двухсторонний фольгированный диэлектрик толщиной 0,2 мм с 0,18 мкм медной фольгой, сухую припойную маску толщиной 50,8 мкм, которая закрывает все переходные отверстия на печатной плате.

Кристалл устанавливают на верхнюю сторону платы на эпоксидный компаунд с серебряным наполнением, разваривают термокомпрессией с использованием золотой проволоки на контактные площадки с переходными отверстиями, к которым на противоположной стороне платы прикреплены шариковые выводы.

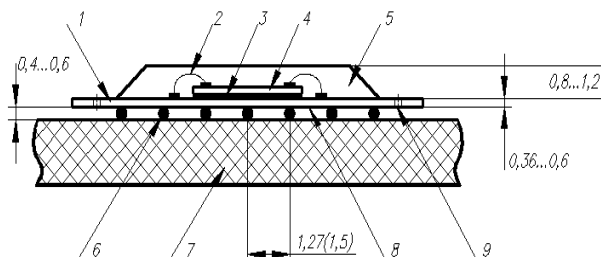


Рис. 1.8. Конструкция корпуса BGA

Эти выводы расположены в узлах прямоугольной сетки с шагом – 1 мм, 1,27 мм и 1,5 мм – нормированных JEDEC. Разваренный на плату кристалл заливают компаундом, обеспечивая надежную герметизацию всей конструкции.

Шариковые выводы диаметром 0,762 мм изготавливают отдельно из эвтектического сплава 62Sn36Pb2Ag с температурой плавления 179°С и устанавливают в углубления на нижней стороне платы на пастообразный флюс при помощи специального приспособления. Распайку выводов на плату производят в конвекционной печи в среде защитного газа (азота) в соответствии со стандартным температурным профилем при максимальной температуре 230°С. После оплавления, для удаления остатков флюса, волокон и других посторонних частиц, плату промывают на центрифуге с использованием не содержащего фреонов органического растворителя Tempele.

Промышленная аналогия, разработанная доктором Цугиро Макимото (фирма Hitachi) [13], связывает полупроводниковую эволюцию с формой египетской пирамиды (рис.1.9). В пирамиде, ее очень широкое основание поддерживает высокую вершину, как и прогресс в полупроводниках поддерживается очень большой базой технологий. В ее основании 5 технологических факторов, поддерживающих структуру пирамиды: проектирование, архитектура процессоров, компоновка, схемы, разрешение, проектирование. Эволюция процесса предполагает появление нового поколения приборов каждые десять лет. Например, в производстве динамических

ОЗУ емкость кристаллов памяти постоянно увеличивается до уровня, на котором 64 Мбитные динамические ОЗУ способны хранить полный словарь информации. Фирма Intel освоила технологический процесс производства транзисторных структур с топологической нормой 65 нм и длиной затвора 55 нм, что позволяет получить чипы памяти SRAM емкостью 70 Мбит и упаковку более 0,5 млрд. транзисторов [14]. Это новое достижение в области нанотехнологии позволит увеличить производительность компьютеров и снизить энергопотребление.

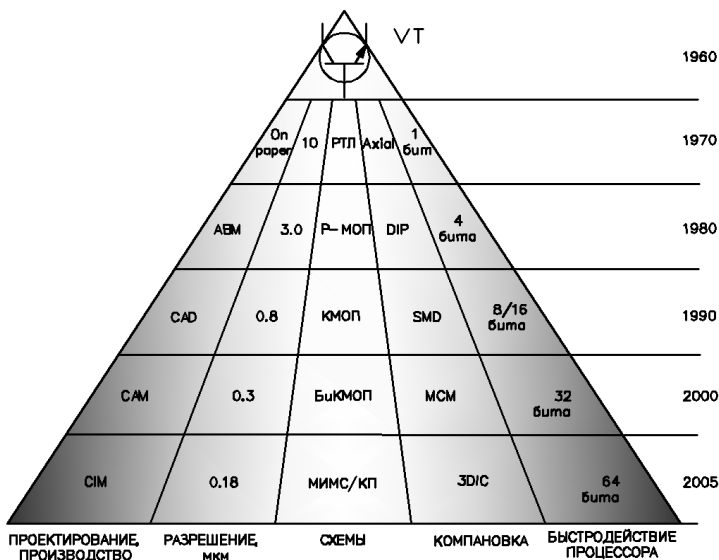


Рис. 1.9. Эволюция полупроводниковой технологии

Например, изобретение микропроцессора и кристаллов памяти сделало возможным производство персонального компьютера. Новые электронные системы будут создаваться технологией энергонезависимой памяти, основанной на КМОП, GaAs и других новых технологиях. Сегодня предъявляются требования к приборам, работающим ниже 5 вольт без потери работоспособности, а также выдвигаются долгосрочные задачи по отношению к обработке кремния на диэлектрике и квантовым приборам.

Отношение размера кристалла к размеру корпуса постоянно увеличивается и приближается сегодня к 70%. Для преодоления

ситуации, в которой размер кристалла увеличивается быстрее, чем размер корпуса, компании разрабатывают корпуса, в которых некоторые кристаллы располагаются вертикально в виде стеков. Другим ключевым аспектом корпусов является способность управлять проблемами увеличения количества выводов и сборки приборов с малым шагом выводов.

При монтаже кристаллов на подложку корпуса и корпуса на плату или при непосредственном монтаже кристалла на плату неизбежно увеличиваются используемые для этого площади. Это вызвано необходимостью выделения определенного физического пространства для размещения выводов. Этот эффект называют уровнем дезинтеграции, которая оценивается отношением плотности микроэлементов на кристалле к плотности размещения выводов на монтажной площади платы, или площади кристалла S_k к площади монтажного поля платы:

$$Q = S_k / S_{пл} \quad (1.27)$$

Например, если кристалл процессора имеет размер 10x10 мм, а монтажное поле его корпуса на плате занимает площадь 4000 мм, такое конструктивное исполнение системы межсоединений характеризуется дезинтеграцией с числом 40. Степень дезинтеграции растет по мере возрастания иерархического уровня конструкции: кристалл—микросхема—модуль—блок. Например, дезинтеграция в электронном блоке может достигать 100 тыс. В табл. 1.2. приведены данные приближенной оценки дезинтеграции при различных методах корпусирования и установки кристаллов микросхем процессора на плату [15].

Таблица 1.2.

Оценка дезинтеграции вариантов монтажа кристаллов

Вариант монтажа	Площадь монтажного поля на плате, мм	Уровень дезинтеграции
Кристалл	10x10	1
Flip-Chip	12,5x12,5	1,5
Wire-Bond	14x14	2
Flip-TAB	24x24	6
TAB	42x42	18
DIP		
Flat-Pack	72x72	52

BGA		
Корпус с периферийными выводами	105x105	110

Степени интеграции и дезинтеграции должны соответствовать техническому уровню развития производства. При стремлении выполнить конструкцию на предельных возможностях производства стоимость изделия будет неоправданно высокой из-за большого количества брака, а надежность таких конструкций не будет гарантирована.

В компьютерных системах широко распространены виртуальная память, кэш на кристаллах, крупномасштабная архитектура и конвейерная обработка данных. Изменения в архитектуре микропроцессора могут перевесить потребность в дорогом и нормально необоснованном экзотическом корпусе и технологиях межсоединений. Архитектурное влияние на микропроцессор является главным элементом в быстром повышении его работоспособности. Общими тенденциями, определяющими процессы сборки электронных модулей в ближайшие годы, являются:

- переход к более миниатюрным, сверхбыстрым электронным модулям с возрастающей степенью функциональности;
- все более короткий срок жизни изделия, за который полная оптимизация спектра компонентов и печатной платы практически невозможна;
- возрастание степени интеграции компонентов (количества каналов ввода/вывода) и повышение рабочих частот;
- передача сборочно-монтажного производства от фирм-разработчиков к специализированным фирмам;
- сборочные системы в большей степени будут использовать программное обеспечение и зависеть от него;
- улучшение коэффициента использования оборудования, увеличение его производительности, качественных и количественных показателей сборки;
- сокращение удельной стоимости монтажа компонентов;
- разработка альтернативных концепций и оборудования сборочно-монтажного производства в целях поиска преимуществ в конкуренции;

- выделение трех быстро развивающихся областей производств в электронной индустрии: персональных компьютеров и периферийных устройств (принтеров, модемов и сетевых адаптеров); средств связи (электронных модулей для АТС и базовых станций сотовой связи); автомобильной электроники (бортовых компьютеров и сенсорных устройств).

Глава 2. ОСНОВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

2.1. Припой и специальные сплавы

Припои, предназначенные для горячего облуживания поверхностей и образования паяного соединения деталей при сборке и монтаже конструкций изделий электроники, должны удовлетворять следующим требованиям: высокая механическая прочность в заданных условиях эксплуатации, высокая электропроводность и теплопроводность, герметичность, стойкость против коррозии, жидкотекучесть при температуре пайки, хорошее смачивание основного металла, малая величина температурного интервала кристаллизации.

По температуре плавления припой подразделяются на следующие группы (ГОСТ 17349-71): легкоплавкие $T_{пл} \leq 145^\circ\text{C}$, легкоплавкие $145^\circ\text{C} < T_{пл} \leq 450^\circ\text{C}$, среднетемпературные $450^\circ\text{C} < T_{пл} \leq 1100^\circ\text{C}$, высокоплавкие $T_{пл} > 1100^\circ\text{C}$. Прежнее деление (низкотемпературные $T_{пл} < 450^\circ\text{C}$ и высокотемпературные) устарело. В производстве ИЭ используются припои первых трех групп. Основную группу легкоплавких припоев составляют оловянно-свинцовые припои системы Sn–Pb (рис. 2.1).

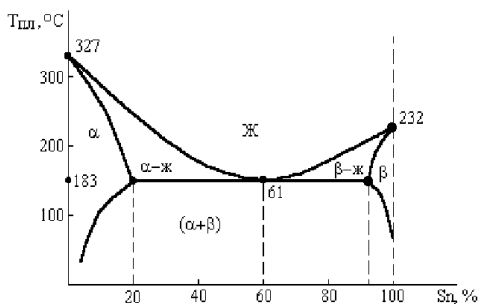


Рис. 2.1. Диаграмма состояния системы Sn–Pb

Наименьшей температурой плавления (183°C) обладает эвтектический сплав (61% Sn, 39% Pb). При концентрации Sn в расплаве от 0 до 20% образуется богатый свинцом α -твердый раствор, при 97,5% – богатый оловом β -твердый раствор. Выше линии ликвидуса в интервале концентраций Sn в расплаве от 20 до 60% образуется α -раствор, т.е. расплав содержит нерастворенные частицы свинца, при концентрации олова от 60 до 97,5% - β -раствор [16].

Состав, температуры плавления и области применения оловянно-свинцовых припоев приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Свойства оловянно-свинцовых припоев

Марка припоя	Состав, % свинец - ост.	Температура плавления, °С	Область применения
ПОС 30	олово 29-30, сурьма 1,5-2,0	183-256	Пайка и лужение меди и ее сплавов, углеродистых сталей
ПОС 40	олово 39-40, сурьма 1,5-2,0.	183-235	Пайка деталей из медных сплавов и сталей
ПОС 61	олово 59-61, сурьма до 0,8	183	Пайка монтажная, лужение выводов ЭРЭ и ИМС
ПОС 61М	олово 59-61, сурьма до 0,8, медь 1,5-2,0.	183-185	Пайка паяльником монтажных соединений
ПОС 63	олово 63±0,5, примеси 0,15	183-185	Пайка волной припоя многослойных печатных плат
ПОС 90	олово 90	183-222	Пайка деталей по гальваническим серебряным и золотым покрытиям

Недостатками припоев системы Sn–Pb является их разупрочнение и ползучесть при температурах выше 100-150°C. Припои ПОС 30, ПОС 40 имеют широкие температурные интервалы кристаллизации, что снижает производительность процессов пайки.

Путем введения легирующих добавок в систему Sn–Pb получают припои, отличающиеся повышенной механической прочностью (Sb), пониженной температурой плавления (Bi, Cd, In), повышенной

электропроводностью (Ag), пригодностью к УЗ пайке и металлизации (Zn), пайке полупроводниковых приборов (In, Au, Ga) и др. (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Свойства специальных припоев

Марка припоя	Состав, % свинец - ост.	Температура плавления, °С	Область применения
ПОССу 10-2	олово 8-10, сурьма 2-3	268-285	Пайка соединений с повышенной прочностью
ПОСК 50-18	олово 50, кадмий 18	142-145	Пайка элементов, чувствительных к перегреву
ПОСВ 33	олово 33, висмут 33	120-130	Лужение печатных плат
ПОСВ 50 (сплав Розе)	олово 25, висмут 50	90-92	Лужение ПП и МПП
ПОСВ 50К (сплав Вуда)	олово 12,5, кадмий 12,5, висмут 50	66-70	Пайка предохранителей
ПОИ _И 50	олово 50, индий 50	117	Пайка подложек ГИС, БГИС, феррита, керамики с
ПСр 45	серебро 45, медь 30, цинк 25	660-725	Пайка изделий из меди и стали при повышенных статических и вибрационных нагрузках
ПСр 2,5	олово 5, серебро 2,5	295-305	Пайка волноводов с серебряным покрытием
ПСр 1,5	олово 15, серебро 1,5	265-270	Пайка соединений, работающих при температуре до 200°С
ПОССр 2	олово 60, серебро 2	169-173	Пайка и лужение по серебряным покрытиям
П150А	олово 40, цинк 3,5	150-165	Пайка и лужение керамики и ферритов с ультразвуком
ПОЦ 10 (П200А)	олово 90, цинк 10	199-210	Пайка и лужение керамики с ультразвуком
ПОЦ 20 (П250А)	олово 80, цинк 20	200-250	Пайка алюминиевых, титановых сплавов с ультразвуком
П300А	кадмий 40,	266-310	Пайка алюминиевых, титано-

	цинк 60		вых сплавов с ультразвуком
ПОС 3л3	олово 60, золото 3.0	180-215	Пайка полупроводниковых приборов
ПГЛМ 65	галлий 65, медь 34-36	50	Пайка термочувствительных элементов с самоупрочнением соединений

Выбор марки припоя определяется требуемой механической прочностью и электропроводностью соединений, максимально допустимой температурой пайки, типом основного металла и технологического покрытия, а также технико-экономическими и технологическими требованиями. Наиболее распространенным припоем для монтажной пайки является оловянно-свинцовый припой ПОС 61, который отличается низкой температурой плавления, узким интервалом кристаллизации, хорошей жидкотекучестью и низким электрическим сопротивлением. Эти факторы способствуют применению групповых методов пайки с высокой производительностью.

Обогащенный медью припой ПОС 61М предназначен, в основном, для ручной пайки, так как он замедляет эрозию паяльного жала. При монтаже штепсельных, высокочастотных и коаксиальных разъемов, кабелей, требующих повышенного нагрева, используют малооловянистые припои ПОС 40, ПОС 30. Пайку и лужение термочувствительных элементов ведут особолегкоплавкими припоями ПОСК 50, ПОСВ 50, ПОСВ 33. Пайку деталей с покрытиями, содержащими серебро, золото, индий, палладий проводят припоями, в состав которых входят эти элементы [10].

Замена традиционных типов припоев на материалы, не содержащие свинца, является не только веянием времени, но и требованием международных комиссий по экологии. Среди термических, механических, усталостных и других свойств припоев одним из самых важных является температура плавления. В таб. 2.3 представлены некоторые из широко известных типов бессвинцовых припоев, а в табл. 2.4 – торговые марки серийно производимых припоев различных производителей [17].

Бессвинцовым припоям с высоким содержанием индия свойственна несовместимость материалов индия и свинца, независимо от того, присутствует ли последний на поверхности печатной платы или на выводах компонентов. Для реализации полностью бессвинцового процесса в некоторых случаях необходимо задействовать бессвинцовое покрытие паяемых поверхностей печатного монтажа и выводов компонентов [18]. Бессвинцовые припои характеризуются либо

слишком низкой, либо слишком высокой температурой плавления по сравнению с эвтектическими свинцово-оловянными припоями. При использовании низкотемпературных припоев необходим специальный флюс, поскольку стандартный спиртоканифольных флюс при низких температурах малоактивен.

Таблица 2.3

Примеры некоторых бессвинцовых припоев и их свойства

Состав припоя	Тпл, °С	Свойства
48 Sn/52 In	118	Низкие температура плавления и прочность, высокая стоимость
42 Sn/58 Bi	138	Стандартный состав, доступность зависит от доступности висмута
91 Sn/9 Zn	199	
93,5 Sn/3 Sb/2 Bi/1,5 Cu	218	Высокая степень шлакообразования
95,5 Sn/3,5 Ag/1 Zn	218-221	Высокая прочность и устойчивость к термической усталости
99,3 Sn/0,7 Cu	227	Высокая прочность и высокая температура плавления
95 Sn/5 Sb	232-240	Высокое сопротивление сдвигу, термоустойчивость
65 Sn/2,5Ag/10 Sb	233	Высокая температура плавления
97Sn/2Cu/0,8 Sb/0,2 Ag	226-228	Высокая температура плавления
96,5 Sn/3,5 Ag	221	Высокая прочность

Таблица 2.4.

Примеры бессвинцовых припоев различных производителей

Тип припоя	Поставщик	Состав	Тпл, °С	Свойства припоя
Indalloy™ 227	Aconitum Specialty Alloy	77,2Sn/ 20 In/ 2,8 Ag	187	Требуется бессвинцовое покрытие площадок и выводов
Alloy H™	Alpha Metals	84,5Sn/ 7,5 Bi/ 5 Cu/ 2 Ag	212	При пайке волной требуется температура 260°С
Tin-Zinc- Indium	AT&T	81Sn/ 9Zn/ 10 In	178	Несовместимость индия и свинца

Castin™	AIM Products	96,2Sn/ 2,5Ag/ 0,8Cu/ 0,5 Sb	215	Высокая прочность и термостойкость
Tin-Silver-Copper	U. S. Dept. of Energy (DOE)	93,6Sn/ 4,7Ag/ 1,7 Cu	217	Высокая прочность и термостойкость

Ещё одним ограничением, связанным с низкотемпературными припоями, является уменьшение их смачивающих свойств, вызванное повышенной текучестью при субэвтектических температурах [19].

Для низкотемпературных применений определённое признание получили припои, содержащие индий. Так, многими компаниями используется припой, содержащий 52% In и 48% Sn, поскольку он обеспечивает лучшие характеристики при повторной пайке в процессе ремонта или переделки. Поскольку температура плавления этого припоя составляет 118°C, повторная пайка при более низкой температуре может производиться многократно без риска теплового повреждения. Если платы покрыты золотом в качестве антиоксиданта, то использование припоя с индием предотвращает выщелачивание золота [20].

Ещё одним бессвинцовым припоем с температурой плавления 138°C является сплав 42 Sn/58 Bi. Висмут используется в припоях для достижения низких температур плавления, но висмутсодержащие сплавы обычно имеют плохие характеристики смачивания.

Многие другие сплавы, представленные в табл.2.3, обладают более высокой температурой плавления, чем свинцово-оловянный эвтектический сплав с температурой плавления 183°C. Это, например, цинк-оловянный бессвинцовый припой с температурой плавления 198°C. Такие припои несовместимы с широко распространёнными материалами для изготовления печатных плат, такими как FR-4. Помимо этого, более высокие температуры при повторной пайке могут увеличить риск повреждения платы.

В настоящий момент не существует бессвинцовых припоев, полностью заменяющих свинцовосодержащие, хотя некоторые производители описывают свои припои как «почти идентичные». Даже в этом случае для повторной пайки требуется температура жала паяльника 400°C. Для некоторых применений эта температура может оказаться слишком высокой и вызвать тепловое повреждение.

Одной из ключевых проблем использования бессвинцовых припоев с повышенной температурой при пайке волной является повышение риска пробоя конденсаторов. При пайке волной следует поддерживать

температуру в диапазоне 230–245⁰С, что на 45–65⁰С выше температуры плавления оловянно-свинцового припоя. Бессвинцовый припой с температурой плавления 220⁰С потребует при пайке волной температуры 265–280⁰С. Это увеличивает разницу температур между предварительным нагревом и пайкой волной и, соответственно, повышает риск повреждения конденсаторов.

В целом, почти все бессвинцовые припои имеют меньшую смачиваемость, чем эвтектические оловянно-свинцовые, и потому первые из них хуже заполняют необходимую площадь. Для улучшения текучести требуются специальные составы флюсов. Усталостные характеристики бессвинцовых припоев также недостаточно хороши, хотя не наблюдалось нарушения целостности паяного соединения после испытания термическим циклом для припоя 96,5 Sn/3,5 Ag [21].

В идеале температура плавления выбранного припоя должна составлять около 180⁰С, так чтобы для оплавления использовалась температура 210–230⁰С; для пайки волной – 235–245⁰С, а для ручной пайки – 345–400⁰С. Более высокие температуры ручной пайки могут использовать только высококвалифицированные монтажники во избежание теплового повреждения электронных компонентов.

Очевидно, что олово и в будущем останется основным компонентом припоя монтажной пайки. Сплавы SnAgCu рассматриваются как наиболее перспективные. Наиболее лидирующие припои на их основе следующие:

- в США - Sn_{3,9}Ag_{0,6}Cu (рекомендован NEMI — National Electronic Manufacturing Industry);

- в Европе – Sn_{3,8}Ag_{0,7}Cu (рекомендован Европейским Консорциумом Brite/EuRam);

- в Японии – Sn_{3,0}Ag_{0,5}Cu (рекомендован JEIDA — Japanese Electronic Industry Development Association).

На испытаниях SnAgCu проявляет функциональную эквивалентность эвтектическому сплаву Sn–Pb–Ag. Однако SnAgCu плавится при 217⁰С, что на 34⁰С больше, чем Sn–Pb. Печатные платы, компоненты, флюсы, подверженные высоким температурам пайки, испытывают большие термодинамические воздействия, которые могут провоцировать разрушения, дефекты и снижать надежность межсоединений. Динамику этих процессов можно оценить из известных представлений об ускорении процессов термодеструкции. С увеличением температуры на каждые 8⁰С количество дефектов будет увеличиваться в два раза [22].

Припой выпускают в виде литой (а) или прессованной проволоки (б), в которой каждое зерно припоя окружено канифолью, при общем ее содержании 0,8-1,2 мас. процента, а также заполненной флюсом одно (в), трех (г) или пятиканальной трубки (рис. 2.5).

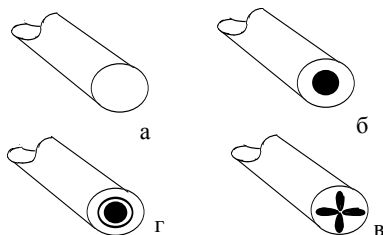


Рис. 2.2. Схемы трубочатых припоев

Применение трубочатого припоя при ручной пайке сокращает на 30-40% расход припоя из-за оптимального дозирования.

2.2. Металлургия припоев и зависимость их свойств от наличия примесей

Припои на основе олова (ПОС 61) получили широкое распространение в технологии пайки благодаря хорошему смачиванию некоторых металлов (меди, никеля, золота, серебра) и невысокой температуре пайки (190—250°C). Существенным недостатком этих припоев является их активное физико-химическое взаимодействие как в расплавленном состоянии, так и в твердой фазе с рядом металлов, применяемых как в компактном виде (пластинки, проволочки) так и в виде тонких покрытий из Au, Ag, Pd, Pt, Cu, Ni, наносимых на конструкционный материал от 1 до 10 мкм. Продукты взаимодействия припоев с этими металлами, т.е. интерметаллические соединения (особенно в виде сплошной прослойки толщиной более 3—5 мкм), могут значительно снизить прочность межсоединений [23].

Исследование растворения металлических проволочек в расплаве припоя системы Pb—Sn показало, что самые низкие скорости растворения 0,043; 1,56; 0,021; 0,356 мкм/с имеют Ni, Pt, Pd при температуре 371°C соответственно [24]. Скорости растворения пленок из этих металлов, полученных напылением и гальваническим осаждением, могут быть значительно больше вышеуказанных вследствие повышенной химической активности пленок. Припои с малым содержанием олова в меньшей степени растворяют медь (табл.

2.7). Добавка в эвтектический припой Pb—Sn меди (0,75—2,3%) также уменьшает скорость растворения меди. Поэтому для пайки медных покрытий рекомендуют использовать как припои с малым содержанием олова, так и эвтектический припой, модифицированный медью. Но следует учитывать, что при быстром перемещении жидкого припоя относительно паяемого материала скорость растворения может превышать вышеуказанные скорости в несколько раз. При пайке элементов приборов припоем ПОС-61 покрытия из Ni, Pt, Pd или их сплавов (Ni—Pd, Ni—Pt) могут применяться как барьерные.

Таблица 2.7

Скорость растворения меди в припоях системы Pb-- Sn

Припой	Температура, °С	Скорость растворения, мкм/с
Pb–1% Sn–1,5%Ag	371	0,0142
Pb–10% Sn	371	0,0457
Pb–20% Sn	371	0,0965
Pb–30% Sn	371	0,2230
Pb–60% Sn	371	1,5600
Pb–60% Sn	316	0,5390
Pb–60% Sn	232	0,1040

В двухслойной контактной системе Au—Sn, полученной путем конденсации молекулярных пучков в вакууме, обнаружена взаимная диффузия в твердой фазе компонентов системы при комнатной температуре [25]. За 48 ч двухслойная пленочная система (толщины пленок Au и Sn составляли 1 700 и 3 000Å соответственно) превращалась при температуре 20°С в пленку однородного состава, соответствующего фазе AuSn. Этот факт свидетельствует о химической несовместимости золота с оловом в неразъемных соединениях.

Другим недостатком припоев на основе олова и индия является то, что тепловое расширение олова и индия, имеющих тетрагональную кристаллическую структуру, крайне анизотропно: ТКЛР вдоль главной оси кристалла примерно в 2 раза больше ТКЛР в направлении, перпендикулярном главной оси. Механические напряжения, обусловленные анизотропией ТКЛР зерен олова и изменением температуры, довольно велики.

Исследование влияния термоциклирования на механические свойства припоев ПОС 61 и ПОС 61М, содержащего медь (1–4%) нагревом до 160°С и охлаждением до 20°С в течение 30 с показало, что по истечении 4 000—5 000 циклов предел прочности на растяжение

припоя ПOC-61 снижается в 2,5—3,0 раза [26]. Усталостные явления в припое развиваются быстрее при наличии в нем меди, а стойкость к термоциклированию полупроводниковых вентиляей падает с увеличением концентрации меди.

Исследована термостойкость соединений паянных припоями 60% Sn/40% Pb в интервале температур от –62 до +140°С. Большая пластическая деформация паяного шва происходила в высокотемпературной части термического цикла (100–140°С) [27]. При низкой температуре припой более прочные (табл. 2.8) и поэтому могут выдерживать большие напряжения, результатом чего является меньшая пластическая деформация в низкотемпературной части цикла.

Таблица 2.8

Предел прочности на срез (МПа) припоев системы Sn–Pb

Припой	Температура, °С					
	–150	–100	–50	20	100	150
Олово	--	82,32	46,06	19,60	10,78	8,82
ПOC-61	93,10	85,26	60,76	33,32	16,66	11,76
ПOC-10	55,86	45,08	35,28	25,48	16,66	13,72
1%Sn-1,5%Ag	49,98	41,16	33,32	25,48	16,66	13,72

Для исследования сопротивления соединений усталостному разрушению последние подвергались термоциклированию, состоящему в нагревании до 160°С с выдержкой в течение 30 мин и охлаждении до –65°С с выдержкой 30 мин в течение 800 циклов [28]. В качестве припоев исследовались сплавы: Pb–40% Sn, Pb–50% Sn, Pb–70% Sn. Исследования соединений показало, что образование усталостных трещин начиналось на периферии паяного шва, т.е. вблизи границы раздела припоя с подложкой ИМС и проволочным выводом. Усталостные повреждения возникали на границах раздела фаз, богатых оловом и свинцом, и трещины развивались в основном вдоль этой границы. Эвтектический сплав Pb–Sn имел большую склонность к зарождению усталостных микротрещин.

Для улучшения качества соединений, паянных припоями на основе олова, предложено осуществлять ориентированную кристаллизацию припоев на поверхности паяемого материала, что может значительно повысить плотность паяного шва и термостойкость паяных соединений [29]. Предлагается укреплять границы зерен припоев на основе олова дисперсными частицами интерметаллидов типа Ni₃Sn, модифицирования припоев медью, серебром, никелем, железом, кобальтом.

Для повышения усталостной прочности припоя на основе олова предложено его армировать его отдельными частицами никеля или железа размером 40—100 мкм в количестве 5—15 вес. % [30]. Эффективность упрочняющего действия частиц второй фазы, стабильных с металлической матрицей, определяется геометрическими параметрами структуры. При этом максимальный эффект достигается при выполнении следующих условий: размер упрочняющих частиц не должен превышать 0,01—0,05 мкм; среднее расстояние между упрочняющими частицами должно составлять 0,1—0,5 мкм при равномерном их распределении в матрице; количество упрочняющей фазы должно быть не более 5—10 % . Поэтому крупные частицы из никеля и железа, образующих с оловом твердые растворы и химические соединения, не могут быть упрочняющей фазой для олова и припоев на его основе. Эффективными упрочнителями могут служить высокодисперсные частицы собственного окисла, двуокиси титана или вольфрама, которые химически стабильны в контакте с оловянной матрицей дисперсно-упрочненного припоя.

При формировании паяных соединений большой площадью с полупроводниками и диэлектриками (диэлектрических подложек ГИС СВЧ с металлическим основанием корпуса) уровень термомеханических напряжений в припое может превышать прочность более “слабого” конструкционного материала, поэтому рекомендуется использовать припои с пределом текучести, меньшим предела прочности на растяжение этого конструкционного материала [23]. Из данных табл. 2.8 и 2.9 следует, что сопротивление припоев на основе олова при 20°C пластическому деформированию может значительно возрастать как при низких температурах, так и при относительно больших скоростях деформации, особенно с ростом степени деформации [31].

Таблица 2.9

Влияние скорости и степени деформации на сопротивление олова пластической деформации

Скорость деформации, с ⁻¹	Степень деформации, %	Сопротивление пластической деформации, МПа
5•10 ⁻³	10	49,98
5•10 ⁻²	30	60,76
5•10 ⁻¹	30	100,94
5	10	107,80
5•10 ¹	30	140,14

Поэтому при эксплуатации приборов с соединениями, паяными припоями на основе олова, в условиях резких термических воздействий,

особенно при минусовых температурах окружающей среды, появляется опасность разрушения таких деталей приборов, как ферритовые, керамические подложки ГИС, кремневые и германиевые кристаллы полупроводниковых устройств. Потеря пластичности оловянных припоев при низких температурах снижает стойкость паяных соединений термическим ударам.

Припои на основе сплавов олова с индием применяются для пайки термочувствительных изделий, предельно допустимая температура которых не превышает 150—250С. Недостатками припоев с высоким содержанием индия является низкая температура плавления (120—156°С), низкая прочность индия, анизотропия теплового расширения индия и повышенная химическая активность к большинству металлов.

Для выбора припоев для УЗ бесфлюсовой пайки и лужении паяемых материалов необходимо учитывать их паяемость, химическое сродство соединяемых материалов и возможность образования того или иного качества соединения в соответствии с диаграммой, построенной на основе экспериментальных исследований фирмы Branson Sonic Power Co. [32] и других авторов [33]. По критерию паяемости материалы подразделяются на три основные группы: легкопаяемые, среднепаяемые и труднопаяемые. Для первой группы в основном применяют особолегкоплавкие и легкоплавкие припои, флюсы или УЗ колебания. Для второй группы подходят легко- и среднеплавкие припои, а также специальные флюсы. Третья группа требует более тщательного подбора припоя и наличия защитной атмосферы (рис. 2.6).

2.3. Флюсы для пайки

Для успешного проведения операции пайки применяют флюсы, которые должны удовлетворять следующим требованиям:

- иметь температуру плавления ниже температуры плавления припоя;
- полностью растворять окислы основного металла, но не образовывать с ним трудноудаляемых химических соединений;
- остатки флюса должны легко удаляться с поверхности основного металла после пайки и не вызывать коррозии паяного соединения;
- флюс и продукты его разложения при выполнении пайки не должны выделять удушливых или вредных газов, т.е. флюс должен быть термически стабилен в заданном интервале температур.

В зависимости от температурного интервала активности флюсы подразделяются на низко- и высокотемпературные. Основные параметры флюсов: химическая активность, термическая стабильность,

температурный интервал флюсования $\Delta T_{\phi}=(T_A-T_{пф})$, где T_A – температура активации, $T_{пф}$ – температура потери флюсующих свойств, коэффициентом растекания припоя. Основные типы флюсов для пайки приведены в табл. 2.10.

Припой		Особолёгкоплавкие $T \leq 150 \text{ } ^\circ\text{C}$							Легкоплавкие $150 \text{ } ^\circ\text{C} < T \leq 450 \text{ } ^\circ\text{C}$					Среднеплавкие $450 < T \leq 1100 \text{ } ^\circ\text{C}$						
		Bi-Sn-Pb-Cd-Zn	Bi-Sn-Pb-In	Sn - In - Ge	In - Cd	Sn-Zi- Cd	Sn - Pb - Bi	Sn - Pb - In	Sn - Pb - Cd	Sn - Pb	Sn - Ag- Cu	Sn - Ag	Sn - Pb - Ag	Sn-Pb-Ag-Sb	Sn - Zn	Pb - Ag	Pb - Sn - Zn	Zn - Pd - Cd	Zn-Cd-Sn- Al	Ag - Cu
Легкоплавкие материалы	Au	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Ag	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Pt	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Sn	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	In	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Cd	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Bi	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Cu	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Cu - Sn	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Cu - Zn	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Cu - Be	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Pd	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Pb	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Среднеплавкие материалы	Fe - C	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
		Fe - Ni	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
		Fe - Cu	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
		Cu-Mn-Ni	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Zn		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Ni		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Трудноплавкие материалы	Ge	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	Al	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	Fe-Cr-Ti	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	Cr	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	Co	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	Mg	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	Mn	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	

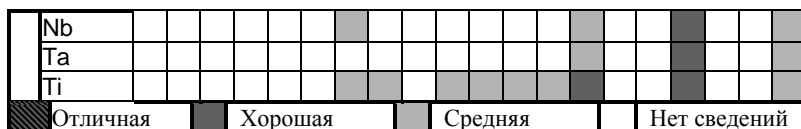


Рис. 2.3. Диаграмма выбора припоев для пайки материалов

Таблица 2.10

Свойства флюсов для пайки

Марка флюса	Химический состав, %	Кр 260°С	Область применения
ФКСп	Канифоль сосновая 10-40, Спирт этил. - ост.	1,0	Некоррозионные смоло- содержащие флюсы для
ФКТ	Канифоль сосновая 10-40, Тетрабромид-дипентен 0,1 Спирт этил. – ост.	1,2	пайки и лужения $\Delta T_{\phi}=200-300^{\circ}\text{C}$
ФКТС	Канифоль сосновая 15-30, Салициловая кислота 3-3,5, Триэтаноламин 1-1,5 Спирт этил. - ост.	1,2	Смолодержащий флюс для монтажной пайки при условии полного удаления остатков флюса
ЛТИ 120	Канифоль сосновая 20-25, Диэтиламин солянокислый 3-5, Триэтаноламин 1-2, Спирт-ост.	2,0	Пайка и лужение с полным удалением остатков
ФТБ	Бензойная кислота 4-4,5, Триэтаноламин 1-1,5 Спирт этил. - ост.	1,1	Водорастворимый флюс для механизированной пайки изделий
ФТС	Кислота салициловая 4-4,5, Триэтаноламин 1-1,5 Спирт этил. - ост.	1,2	Пайка печатных и многослойных плат $\Delta T_{\phi}=225-325^{\circ}\text{C}$
ФГСп	Гидразин солянокислый 2-4, Глицерин 25-30, Спирт этиловый ост.	1,5	Пайка и лужение деталей бытовых ИЭ
ФСкП с	Семикарбазид гидрохлорид 3- 5,Полиокс- 100 27-37, Глицерин ост.	1,8	Лужение печатных плат и выводов элементов с удалением остатков флюса
ФДФс	Диэтиламин солянокислый 20- 25, Кислота ортофосфорная 20, Этиленгликоль - ост.	2,0	Пайка деталей из черных и цветных металлов с удалением остатков.
34 А	Хлористый калий - 50 Хлористый литий - 32 Фтористый натрий - 10 Хлористый цинк - 8	5,0 на АМц	Пайка алюминиевых и титановых сплавов $\Delta T_{\phi}=415-35^{\circ}\text{C}$
Ф370 А	Калий хлористый 51-46 Литий хлористый 36-39	9,2 на АМц	Пайка алюминиевых и титановых сплавов

	Натрий фтористый 4-5 Кадмий хлористый 9-10		$\Delta T_{\text{ф}}=360-380^{\circ}\text{C}$
ФТБф	Кадмий борфтористый 9-11 Цинк борфтористый 2,5-3,5 Аммоний борфтористый 4,5-5,5 Триэтаноламин ост.		Пайка деталей из алюминиевых сплавов $\Delta T_{\text{ф}}=270-350^{\circ}\text{C}$

Смолосодержащие флюсы на основе канифоли имеют органическое происхождение. С химической точки зрения канифоль является нелетучей фракцией смолистых веществ хвойных деревьев, в ее состав входят кислоты: абиетиновая и пимаровая, которые при температуре $225-300^{\circ}\text{C}$ растворяют тонкие окисные пленки на меди и олове. Достоинством флюсов на основе канифоли является нетоксичность, отсутствие коррозионного действия, длительная сохраняемость. Недостатки: малая активность, трудность удаления смолистых остатков, пары канифоли необходимо удалять с рабочего места при помощи местной вытяжной вентиляции.

Для повышения активности флюсов в их состав вводят активирующие добавки, которыми являются: анилин $\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$, гидразин, триэтаноламин $\text{N}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH})_3$, солянокислый диэтиламин $(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{NHCl}$, а также органические кислоты: салициловая, адипиновая, щавелевая, лимонная, молочная и др. При введении активаторов стремятся к тому, чтобы в температурном интервале пайки добавки со щелочными свойствами (триэтаноламин) нейтрализовали остатки веществ, имеющих кислотные свойства (салициловая кислота, солянокислый диэтиламин и др.).

Смолосодержащие флюсы удаляются трехкратной промывкой в смеси (1:1) бензина и этилового спирта при 20°C или УЗ обработкой. Водорастворимые флюсы удаляются струйной промывкой в горячей проточной воде с последующей протиркой щетками.

Для сокращения выброса легколетучих органических компонентов с 90% до 1% для волной пайки начинают применять флюсы MF220 и MF300 на водной основе с содержанием твердых веществ $4,6 \pm 0,2\%$, классификацией по IPC-SF-818 как ОРМО, кислотным числом $37 \pm 2,5$ мг КОН/г. Флюса наносят распылением, увеличивают температуру предварительного нагрева до $110-120^{\circ}\text{C}$, что снижает термоудар на печатную плату на $20-30^{\circ}\text{C}$ и улучшает смачивание припоем. Количество дефектов при волновой пайке бессвинцовыми припоями с использованием флюсов на водной основе сокращается в 2,5 раза [34].

Для высокотемпературной пайки используют буру - обезвоженный тетраборнокислый натрий $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$. Наиболее низкие температуры плавления среди боратных флюсов имеют системы $\text{B}_2\text{O}_3 - \text{N}_2\text{O}$ (B_2O_3)₂,

содержащие 15–20% борного ангидрида (570–650°C). Для пайки алюминиевых и магниевых сплавов применяется легкоплавкая эвтектика солей $KCl:LiCl:NaCl$, которая обеспечивает хорошую жидкотекучесть при низких температурах (450–500°C). Такие флюсы обладают высокой химической активностью, поэтому их остатки после пайки должны удаляться особенно тщательно.

2.4. Припойные пасты для изделий электроники

Технология поверхностного монтажа вызвала широкое применение припойных или паяльных паст, представляющих собой механическую смесь порошка припоя, связующего вещества, флюса и некоторых других компонентов. В настоящее время это один из наиболее перспективных, удобных и гибких способов дозирования паяльных материалов в условиях автоматического производства.

Припойная паста обеспечивает значительную (до 30–50%) экономию припоя благодаря точному дозированию, а клеящие свойства позволяют использовать пасты для фиксации элементов перед пайкой. Основным компонентом пасты является порошок припоя (75–95 мас. %), в виде сферических частиц диаметром 10–150 мкм, получаемых УЗ распылением жидкого припоя. В качестве связующих веществ используют органические смолы или их смеси. Кроме них в пасту вводят разбавители, пластификаторы, тиксотропные вещества. Последние препятствуют оседанию частиц припоя при хранении, повышают разрешающую способность пасты, обеспечивают заданный диапазон вязкости.

Для распыления припоя применяют УЗ установки на магнитострикционных или пьезоэлектрических преобразователях (рис. 2.7). Заготовка в виде прутка припоя подается в зону плавления высокочастотного индуктора, а затем капли припоя падают на колеблющийся волновод и распыляются. Распыление происходит в среде азота с производительностью до 1 кг/час. Внешний вид УЗ установки для получения мелкодисперсных порошков низкотемпературных припоев приведен на рис. 2.8. В установках получают порошки припоев ПОС 61, ПОИн-52, ПОСК 50-18 с размером сферических частиц 10–160 мкм, в которых содержание кислорода по массе из за распыления в среде инертного газа не превышает $5 \cdot 10^{-2} \%$.

Средний размер распыляемых частиц определяется выражением:

$$d = 0,3 \sqrt[3]{\frac{8\pi \cdot \sigma}{\rho \cdot f^2}}, \quad (2.1)$$

где σ - коэффициент поверхностного натяжения припоя, ρ - плотность припоя, f - частота УЗ колебаний.

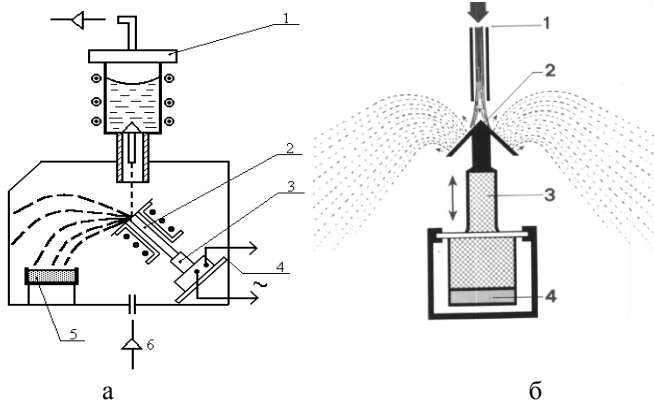


Рис. 2.4. Схема УЗ распыления припоя односторонняя (а) и двухсторонняя (б): 1 –подача расплава припоя, 2 - резонатор, 3 - ступенчатый волновод, 4 - преобразователь, 5 - тара, 6 - подача газа



Рис. 2.5. УЗ установка получения порошков припоев

Припойные пасты представляют собой механическую смесь порошка припоя, связующего вещества (или связки), флюса и

некоторых других компонентов. Дисперсность частиц припоя в пасте составляет 20–40 мкм, вязкость по пределу растекаемости 13–23 мм, время оплавления 3–5 с. Пасту можно нанести ровным, точно заданным слоем с помощью механизированных и автоматизированных средств. Промышленность ряда стран выпускает припойные пасты, отличающиеся типом припоя, составом флюса и свойствами (табл. 2.11).

Таблица 2.11

Свойства припойных паст

Марка пасты	Тип припоя	Флюсы	Температурный интервал, °С
ППП-180	ПОС 61	Активированная канифоль	190–230
ППП-180 Ср	ПсрОСЗ-58	– “ –	190–230
ПП-140	ПОСК 50-18	– “ –	140–155
ПП-250	ПСОВиСу	– “ –	260–290
SC 3301 Heraeus (Германия)	Sn - 63%, Pb - 37%	Производные органических кислот	210–235
SC 6004 Heraeus (Германия)	Sn - 48%, In - 52%	– “ –	140–170
96 SC Multicore (Англия)	Sn -/99,5, Ag 3,8, Cu 0,7	RP 15	240–260

К припойным пастам предъявляются ряд требований. Они не должны окисляться, сильно и быстро расслаиваться, должны долго и сохранять свои реологические свойства (т.е. способность к вязкому течению и деформациям), не растекаться далеко за пределы первоначально нанесенной дозы, не оставлять твердых и трудно удалимых остатков после пайки, обладать клеящими свойствами, не разбрызгиваться при воздействии концентрированных источников энергии, не ухудшать электрических характеристик печатной платы, отмываться в стандартных растворителях, наноситься на поверхность нужным способом, не быть чрезмерно дорогими и т. д. [35].

Производство припойных паст во всем мире резко возросло за последнее десятилетие, поскольку это один из наиболее перспективных, удобных и гибких способов дозирования паяльных материалов в условиях автоматизации. Для приготовления и нанесения припойных паст разработано оборудование, в том числе и автоматическое. Припойные пасты выпускают фирмы Du Pont, ЕМКА, Alpha Metals, Anjard Paste Technology, EFD (США), Heraeus (Германия), Multicore (Англия) и др. Промышленность стран СНГ выпускает припойные

пасты марок ПЛ1-1, ПЛ1-3, ПЛ-112, ПЛ-212, ПЛ-312, ППЛ-ОС-61, ПП1-180, ПП-250.

Припойная паста обеспечивает значительную, до 30-50 % экономию припоя благодаря точному дозированию. Клеящие свойства некоторых паст позволяют использовать их для фиксации элементов перед пайкой. Припойные пасты характеризуются растекаемостью в исходном состоянии (или расплывание за пределы нанесенной дозы), расслаиваемостью (седиментация) - оседание порошка припоя в пасте при хранении, растекаемостью во время пайки, смачиванием паяемого металла, которое нужно учитывать при разработке процесса пайки.

Основным компонентом припойной пасты является порошок припоя, его может быть 75–95 мас.%. Размер и форма частиц порошка оказывают сильное влияние на реологические свойства пасты. Так, присутствие в пасте крупных частиц ухудшает свойства пасты. При большом числе мелких частиц они заполняют пространство между крупными частицами и ухудшают текучесть пасты. Кроме того, мелкие частицы имеют относительно большую площадь поверхности, что увеличивает скорость их окисления. Наилучшие результаты получаются при использовании частиц диаметром 10–150 мкм.

Форма частиц определяет во многом способность пасты дозироваться тем или иным способом. Частицы припоя сферической формы придают пасте способность к легкому продавливанию через узкие отверстия сетки или дозатора.

Паяемость припойной пасты в значительной степени зависит от степени окисления и загрязненности поверхности частиц порошка припоя. По зарубежным стандартам припой не должен содержать более 0,5% кислорода. Но важно не объемное содержание кислорода, а количество его в тонком приповерхностном слое, реагирующем в самом начале процесса пайки с флюсом и основным металлом. Отрицательное влияние на свойства пасты оказывает также углерод, который по некоторым предположениям попадает на поверхность частиц порошка из тары и упаковки в процессе хранения и транспортировки. Поэтому на всех этапах, начиная от изготовления порошка и кончая пайкой, необходимо принимать все меры против взаимодействия частиц с кислородом и углеродом. Вводимый в припойную пасту флюс играет ту же роль, что и при пайке компактным припоем. Обычно в пасту вводят те же флюсы, которые используют и при обычной пайке.

Основные физико-химические свойства припойных паст создаются благодаря введению в порошок припоя 4–15% связующих веществ. Именно они (иногда с добавлением растворителя) придают пасте

нужную консистенцию, препятствуют расслоению и растеканию припойной пасты, повышают ее разрешающую способность, придают клеящие свойства, адгезию к подложке и т.п. Связующее вещество нейтрально по отношению к припою в ходе хранения и пайки, а при нагреве и пайке улетучивается или расплавляется без образования трудно удалимых твердых остатков. В качестве образующих веществ используют органические смолы или их смеси, разбавители и другие вещества. К ним добавляют растворители, пластификаторы, тиксотропные вещества. Последние препятствуют оседанию частиц порошка припою во время хранения, повышают разрешающую способность пасты, обеспечивают заданную вязкость.

Повышение плотности монтажа и уменьшение размеров контактных площадок, а также переход на бессвинцовые паяльные пасты ужесточают требования к точности и повторяемости параметров процесса нанесения пасты трафаретной печатью при условии обеспечения высокой производительности: время цикла не более 14,5 с, повторяемость 25 мкм & 4 сигма, диапазон скорости ракеля 2–150 мм/с, давление ракеля 0–20 кг [35]. Эти требования могут быть обеспечены при использовании автоматов трафаретной печати типа Horizon и др.

2.5. Инертные и восстановительные газы

В обычном состоянии поверхность металлов покрыта оксидными пленками. Нагрев основного металла и расплавленного припоя приводит к тому, что их активность снижается вследствие взаимодействия с кислородом воздуха и ростом оксидных пленок на поверхности, удаление которых является необходимым условием для получения качественных паяных соединений. Классификация способов удаления оксидных пленок приведена на рис.2.6.

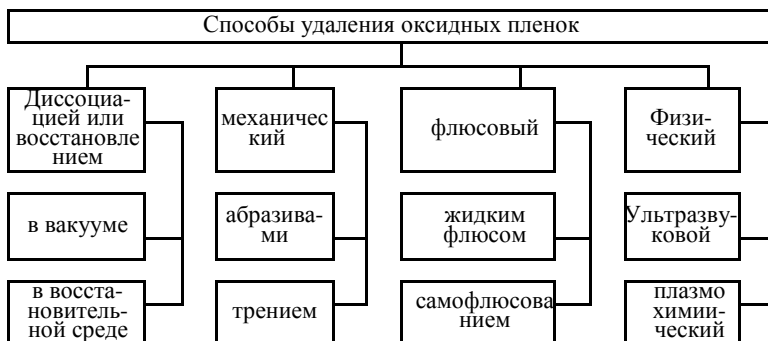


Рис.2.6. Классификация способов удаления оксидных пленок

Константа равновесия реакции окисления металла K_p зависит от давления паров кислорода в окружающей среде при данной температуре [10]:

$$K_p = \frac{P_{me}^n \cdot P_{O_2}^{m/2}}{P_{me} O_m}, \quad (2.2)$$

где P_{me} , P_{O_2} , $P_{me} O_m$ - давление паров металла, кислорода и окисла соответственно. Уменьшая парциальное давление кислорода и увеличивая температуру среды, можно сместить равновесие реакции в сторону разложения (диссоциации) окисла. Однако полное разложение окислов металла (например, олова, меди) происходит при очень низком давлении (10^{-6} – 10^{-8} Па) и температуре 600–700°C.

Для безокислительного нагрева могут быть использованы инертные и активные газы. Из инертных газов наибольшее распространение в качестве защитной среды получил аргон. К активным газам, используемым для безокислительного нагрева, относятся: водород, окись углерода, азот, трехфтористый бор, треххлористый бор, трехбромистый бор, треххлористый фосфор и др. Широко применяются при пайке и термической обработке различные газовые смеси, содержащие в том или ином количестве водород, окись углерода, азот и другие компоненты—эндо- и экзогазы, диссоциированный аммиак и т. д.

К газам, используемым при пайке, предъявляются более повышенные требования по чистоте, чем при безокислительном нагреве для термообработки металлов. При термообработке во многих случаях достаточно иметь светлую поверхность изделия, а при пайке этого недостаточно. На светлой поверхности металла может образоваться тонкая окисная пленка, не видимая невооруженным глазом.

Такая пленка, однако, может служить серьезным препятствием для растекания припоя. Поэтому для пайки могут быть использованы лишь некоторые типы защитно-восстановительных газов, широко применяемых в промышленности. Бор-галоидные и фосфор-галоидные соединения могут быть использованы вместе с газами-носителями, в качестве которых служат аргон, азот или водород. Концентрация галоидсодержащих компонентов обычно составляет менее 1% .

При нагреве металлов в активных (восстановительных) газовых средах, в качестве которых используют азотно-водородную смесь или добавку окиси углерода, происходит восстановление оксидов металлов активными компонентами газовых сред по реакциям [36]:

$$\frac{1}{n} Me_m On + H_2 = \frac{m}{n} Me + H_2O; \quad (2.3)$$

$$\frac{1}{n} Me_m On + CO = \frac{m}{n} Me + CO_2; \quad (2.4)$$

Недостатком такого процесса является взаимодействие водорода с расплавленным припоем, что приводит в ряде случаев к появлению водородной хрупкости, образованию пор, трещин и других дефектов.

В табл. 2.12 приведены характеристики газов, используемых для безокислительного нагрева металлов.

Таблица 2.12

Восстановительные газы для безокислительного нагрева

Газовая среда и ее условное обозначение	Состав	Осушка до точки росы в °С	Область применения
Водород H ₂	100 H ₂	-80 -60	Пайка сталей всех марок, жаропрочных сплавов
Диссоциированный аммиак ДА	75 H ₂ , 25 N ₂	-60 -40	Пайка деталей из легированных и нержавеющей сталей
Продукт неполного сжигания аммиака ПСА-0,8	7—20 H ₂ , ост. N ₂	-40	Пайка малоуглеродистых сталей
Генераторный газ без внешнего обогрева в восстан. зоне ГГ-С	6 H ₂ , 30 CO, 2 CO ₂ , 1 CH ₄ , ост. N ₂	-10	— “ —
Генераторный газ с внешним обогревом в восстановительной зоне ГГ-ВО	8 H ₂ , 34CO, 0,5 CO ₂ 1 CH ₄ , ост. N ₂	-5	Пайка средне- и высокоуглеродистых и легированных сталей
Генераторный газ из антрацита, очищенный от CO ₂ ГГ-0	12H ₂ , 25CO, 0,2CO ₂ 2CH ₄ , ост. N ₂	-40	— “ —
Водяной газ	50 H ₂ 35 CO, 5CO ₂ 1CH ₄ , ост. N ₂	-40	Пайка малоуглеродистых сталей
Светильный газ	51 H ₂ , 9 CO, 2CO ₂ 1 CH ₄ , ост. N ₂	-40	— ” —

Продукт сжигания углеводородных газов с очисткой от CO_2 ПСО-06	16H_2 , 10CO , $0,1\text{CO}_2$, $1,5\text{CH}_4$, ост. N_2	-40	Пайка деталей из высокоуглеродистых и легированных сталей
Эндогаз с частичным сжиганием КГ-ВО	40H_2 , 21CO , ост. N_2	-40	Пайка легированных сталей

Восстановительные свойства этих газов определяются концентрацией водорода или окиси углерода, а также степенью очистки газов от паров воды, углекислого газа, кислорода и других примесей.

2.6. Защитные жидкости и покрытия для пайки

Расплавленный припой в ваннах лужения и пайки соприкасается с воздухом и окисляется. Этот процесс происходит особенно активно при пайке волной припоя, так как в контакт с воздухом вступают все новые порции припоя. Образуется так называемый шлам, или дросс. Частицы шлама подаются в ванну, перемешиваются с припоем и снова затягиваются насосом в волну припоя, а из нее – в паяные соединения и на поверхность платы. Если не принимать специальных мер, то расход припоя на окисление и угар в ванне средних размеров может достигать 3 кг и более за смену.

Для защиты поверхности расплавленного припоя применяют защитные жидкости, которые кроме защиты от окисления, выполняют ряд функций: восстанавливают окислы меди; снижают поверхностное натяжение припоя и увеличивают его смачивающую способность; уменьшают наплавы припоя на широких проводниках, а также сокращают такие дефекты, как перемычки и сосульки; позволяют на 10–20°C снизить температуру пайки, что уменьшает тепловое воздействие на полупроводниковые приборы. Основными компонентами защитных жидкостей являются: минеральные масла на основе углеводородов с высокой термической стабильностью, жировые масла растительного или животного происхождения, обладающие смачивающими свойствами, кремнийорганические жидкости и другие. Защитная жидкость должна иметь следующие свойства:

- температуру вспышки в открытом месте, превышающую температуру пайки (для ТП-22 температура вспышки – 230°C, а самовоспламенения – 300°C);
- высокую термическую стабильность при температуре расплавленного припоя (230–260°C), например, в течение 1–2 смен работы линии пайки;

- слабо испаряться и легко удаляться обычными растворителями;
- показатель кислотности свежей жидкости не должен превышать 14 мг КОН/г.

Составы и свойства некоторых применяемых в промышленности защитных жидкостей приведены в табл. 2.13 и 2.14. Основой большинства из них являются минеральные масла на основе углеводородов с высокой термической стабильностью и температурой вспышки. Применяются также масла растительного или животного происхождения, обладающие значительно лучшими смачивающими свойствами, но гораздо худшей стойкостью к окислению при повышенной температуре и более низкой температурой вспышки.

Таблица 2.13

Составы защитных жидкостей

Марка жидкости	Компоненты	Содержание, масс., %
ЖЗ-1	Масло цилиндровое № 52	79–81
	Кремнийорганическая жидкость ПМФС-6	16–17
	Олеиновая кислота	4,9–1,8
ВМ-71	Масло авиационное № 20	8–90
	Свиной жир технический (глицерид)	7–15
	Олеиновая кислота	3–5
ТП-22	Масло ВИ-250 или П-28	90–93
	Олеиновая кислота	7–10
ЖЗФ-350	Закалочное масло МЗМ-120	85–95
	Фосфаты подсолнечного масла	1–10
	Канифоль фумаризованная	0,5–8,0
	Ионол (4-метил-2,6-дитретичный бутилфенол)	1 м. ч. на 100 м. ч. жидкости
ЖЗК-400	Фосфаты подсолнечного масла	4–8
	Ионол	1–1,5
	Стеарат свинца	1–2
	Кремнийорганическая жидкость ПМФС-4	Остальное
Фирма Shevron (США)	«Брайтсток-185»	90
	Лярд	5
	Олеиновая кислота	5
	Фенольный антиоксидант	0,25

В качестве защитных жидкостей при групповой пайке используют ЖЗ-1, ТП-22; ВМ-71; ЖЗФ-350, ЖЗК-400. Способы подачи жидкости в зону пайки могут быть различными: с помощью валика,

соприкасающегося с волной припоя, капельным методом, внутрь объема припоя.

Поверхностное натяжение защитных жидкостей колеблется в пределах 0,017–0,028 Н/м (у расплавленных металлов 0,1–1,0 Н/м). Защитную жидкость подают в зону пайки различными способами: из бачка в узкую ванночку с помощью валика, соприкасающегося с волной припоя; из отдельной емкости через регулирующий кран в нижний отсек сопла, где дробится потоком припоя на мелкие капли и пленки (система Intermix фирмы Hollis Engineering); на зеркало припоя; циркулирует между подогреваемой емкостью и ванной с припоем (или другой емкостью, в которую она поступает из ванны с припоем).

Таблица 2.14

Свойства защитных жидкостей

Наименование параметра	Значение параметра					
	ЖЗ-1	ВМ-71	ТП-22	ЖЗФ-350	ЖЗК-400	Shevron
Цвет	Темный	Темный	Темный	Темный	Светлый	Светлый
Плотность при температуре 20С,г/	0,97–0,9	0,896	0,91	0,9	0,9	-
Вязкость кинематическая при 100°С, сСт	61,9–63,8	15,0–17,0	20,0–24,0	-	-	-
Температура, °С:						
вспышки	250	252	230	218	400	250
воспламенения	270	-	250	250	-	-
Застывания	-4	-4	-10	-10	-10	-10
Кислотное число, мг КОН/г,	5,38	10,36	17	14-18	22	122 по STM США
Срок сохранения защитных свойств в расплаве, ч	10	8	4–6	6	-	10

Расход защитной жидкости зависит от конструктивных особенностей паяльной установки, способа подачи и срока службы жидкости. При постоянной подаче свежей защитной жидкости. При постоянной подаче свежей защитной жидкости на волну припоя расход составляет 2–4 дм³ в смену (в установке УПВ-903). При подаче внутри

объема припоя ее расход составляет до 10 дм^3 в смену на объем 200 кг припоя. При нанесении защитной жидкости на зеркало припоя расход ее зависит от площади зеркала припоя и составляет менее 1 дм^3 в смену. Применение защитных жидкостей дает значительную экономию припоя. Расход его на угар снижается до 0,5 кг в смену [35].

Несмотря на перечисленные преимущества защитных жидкостей их используют не всегда, так как их применение влечет за собой и ряд отрицательных моментов. Повышается опасность пожара; возрастают расход промывочных жидкостей на очистку оборудования, затраты на их приобретение и дополнительное обслуживание. Кроме того, применяются такие меры по повышению качества пайки и снижению расхода припоя, как короткое включение подачи припоя в волну только на время прохождения платы, применение более активных флюсов. В условиях возрастающих ограничений в поставках олова применение защитных жидкостей будет все более возрастать.

2.7. Материалы для очистки соединений

Как правило, после пайки на плате остается еще некоторое количество флюса и продуктов его разложения. Они могут вызвать коррозию, ухудшить электрические параметры схемы, деградацию паяных соединений. Необходимость очистки платы после пайки решается в зависимости от требуемой степени надежности аппаратуры, условий ее эксплуатации, назначения изделия. При использовании защитных масел очистка обязательна во всех случаях.

В процессе пайки волной припоя часть флюса с поверхности печатных узлов испаряется и осаждается на конвейере. Налипание флюса на пальцы конвейера приводит к тому, что не обеспечивается постоянная высота платы над волной припоя, а значит, снижается надежность процесса пайки, увеличивается число непропаев вследствие загрязнения изделия нагаром флюса с конвейера.

Регулярной очисткой оборудования пайки достигается двойной эффект. С одной стороны, увеличивается срок службы оборудования, с другой стороны предотвращают ряд потенциальных технологических дефектов. Современные требования производства ставят жесткие задачи по повышению производительности и уменьшению времени простоя сборочных линий во время обслуживания. Отсюда возникает требование производить очистку оборудования пайки максимально быстро и безопасно.

Для очистки и промывки плат применяют различные растворители и составы, включая воду. Общее правило при этом заключается в следующем: моющие составы должны быть способны растворять как связующее вещество, так и основной материал флюса. Удаление остатков канифольных флюсов осуществляют спиртом, спирто-бензиновой смесью, трихлорэтиленом, четыреххлористым углеродом. Однако эти жидкости пожароопасны и токсичны. Широко применяемые в 70-е годы фтор- и хлоруглеродистые растворители: хладон-113 и Ф-114В с температурой кипения 47,57 и 47,25⁰С соответственно, обеспечивали высокую степень очистки, были не пожароопасными, мало токсичными, химически стойкими и универсальными растворителями. Обладая низким поверхностным натяжением, фреон проникал в углубления и под скопления загрязнений, а благодаря исключительной способности к смачиванию легко смачивал самые маленькие зазоры, захватывая частицы загрязнений. После подписания Монреальского соглашения фреоновые технологии, как экологически опасные, оказались под запретом.

Промывочная жидкость VIGON RC101 компании Zestron на водной основе по MPC (Micro Phase Cleaning) технологии обеспечивает удаление нагара канифольных, водосмываемых, флюсов с низким содержанием твердых веществ. Активные компоненты MPC, присутствующие в растворе промывочной жидкости имеют форму микроскопических капелек–микрофаз. Микрофазы могут эффективно удалять с поверхности плат и соединений жировые загрязнения, остатки флюса и остатки неотвержденного эпоксидного клея. Удаленные частицы загрязнений освобождаются микрофазами и переходят в раствор, таким образом, происходит самоочищение микрофаз (рис. 2.7).

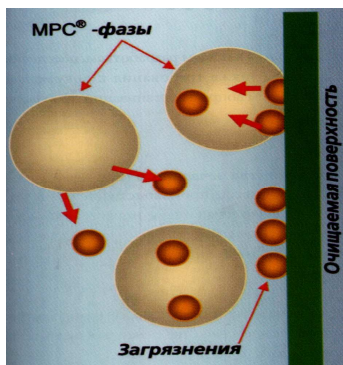


Рис. 2.7. Удаление загрязнений микрофазами

В отличие от поверхностно-активных веществ (ПАВ), у промывочных жидкостей по MPC технологии не происходит истощения активных компонентов, и после очистки на поверхности не остается загрязнений и налета. Микрофазы не накапливают загрязнения, как ПАВ или спирто–бензиновая смесь, а работают в качестве переносчика. Поскольку частицы загрязнений не растворяются полностью в промывочной жидкости, то они легко удаляются фильтрацией. Водная основа сокращает время и делает процесс безопасным. Ванна отмывки оснащается двухступенчатой системой поглощения загрязнений: предварительным фильтром с размерами ячеек 20 мкм и основным с размерами ячеек 5 мкм.

Для интенсификации процесса отмывки, особенно под низкопрофильными корпусами компонентов, используют центрифугирование, струйную отмывку под высоким давлением, подачу сжатого воздуха (барботаж) и использование энергии УЗ колебаний. Высокая эффективность воздействия УЗ колебаний достигается благодаря возникновению акустической кавитации, созданию микро– и макропотоков в жидкой среде. Для отмывки плат оптимальная частота УЗ колебаний находится в диапазоне 35–44 кГц. Особенность очистки печей оплавления состоит в том, что перед обслуживанием их приходится охлаждать до комнатной температуры, чтобы обеспечить пожаробезопасность. Из-за низкой точки вспышки традиционных материалов нет возможности распылять их на горячие поверхности печей. Процесс охлаждения может занять несколько часов, что вызывает простаивание всей сборочной линии. Поскольку промывочная жидкость VIGON RC101 не имеет точки вспышки, это позволяет начинать обслуживание при температуре 40°C, при которой рабочий будет чувствовать себя комфортно без опасения обжечься об горячие поверхности печи. Промывочную жидкость наносят по всей загрязненной поверхности и вытирают тканым или бумажным материалом растворенные загрязнения.

Не менее важно сохранять в чистоте пальцы конвейера установки пайки волной припоя. Для автоматической очистки установки пайки волной припоя могут оснащаться специальной системой с замкнутым циклом. В ней промывочная жидкость распыляется на загрязненный конвейер и стирается щетками и тем самым обеспечивается постоянное высокая степень чистоты конвейера и увеличивается срок его службы. Использование VIGON RC101

гарантирует безопасность для здоровья персонала. Жидкость не имеет испарений, приводящих к раздражению, что подтверждено классификацией HIMS (Система Идентификации Раздражающих Веществ), по которой VIGON RC101 классифицируется 0 — 0 — 0, где 0 — наименее, а 4 — наиболее опасный компонент.

-

Глава 3. МАТЕРИАЛЫ СОЕДИНЕНИЙ И ОЦЕНКА ИХ ПАЯЕМОСТИ

3.1. Основные материалы паяных соединений в изделиях электроники

Для изготовления изделий электроники широко применяются как металлические, так и неметаллические материалы: металлы, сплавы, псевдосплавы, диэлектрики, полупроводники. Корпуса БИС, микросборок, гибридных пленочных СВЧ–микросхем и многофункциональных модулей изготавливают из алюминия, его сплавов, меди, сплавов никеля и др. [2]. В качестве материала диэлектрических подложек применяется керамика из окиси алюминия. В случае больших мощностей рассеивания используют подложки из окиси бериллия, теплопроводность которой в 10—12 раз больше теплопроводности окиси алюминия. Наряду с керамическими, начинают все шире использовать полиимидные, стеклоэпоксидные и другие значительно более дешевые подложки. В ГИС СВЧ диапазона материалом для диэлектрических подложек, на которых путем пайки или сварки монтируются активные (диоды, транзисторы) и пассивные (резисторы, индуктивности, конденсаторы) навесные элементы, наряду с алюмооксидной керамикой (А-995, поликор), служат также сапфир, кварц, ситалл и феррит (табл.3.1). Выбор диэлектрических и металлических материалов во многом определяется электрическими, тепловыми, механическими характеристиками изделий, а также внешними климатическими условиями их работы. Диэлектрические подложки имеют плохую совместимость по ТКЛР с корпусами из высокопроводящих металлов: меди и сплавов алюминия. В зависимости от выбора соответствующей пары соединяемых материалов разница их ТКЛР может снижаться от $19 \cdot 10^{-6}$ до 0 C^{-1} . Для повышения надежности паяных соединений в изделиях электроники необходимо стремиться к выбору пары материалов с возможно меньшей разницей ТКЛР (табл.3.2). В качестве конструкционного металла, соединяемого с

алюмооксидной и бериллиевой керамикой, применяют сплавы вольфрама или молибдена с медью, например МД15НП, в крайнем случае—ковар 29НК или фени-43Н. При создании соединений большинства диэлектриков с алюминием или его сплавами необходимо использовать компенсирующие прокладки. Исключением являются полиимидные диэлектрики, имеющие ТКЛР, близкий к ТКЛР алюминия.

В случае анизотропных монокристаллических диэлектриков, например, сапфира, следует брать металл или сплав со средним ТКЛР относительно ТКЛР анизотропного диэлектрика в направлениях, параллельном и перпендикулярном оптической оси.

Таблица 3.1

**Свойства конструкционных материалов, применяемых
в изделиях электроники**

Материалы	Температура плавления, °С	ТКЛР, $\cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	Модуль упругости, ГПА	Теплопроводность при 20°С, кал/см \cdot с \cdot град
Диэлектрики				
Поликор	2 050	6,9	315,5	0,055
А-995	2 050	6,2	372,4	0,04
Брокерит	2 570	--	288,1	0,4
Оксид бериллия	2 570	6,2	288,1	0,55
Сапфир	2 050	6,05–7,08	372,4	0,082
Ситалл СТ-36	> 1 200	5,7	118,58	0,008
Кварцевое стекло	1 500	0,51	65,66	0,0028
Монокристаллический кварц	1 500	6,0–7,0	--	0,0035
Феррит 10СЧ6	--	4,9—6,1	200	0,009
Полиимид	600	30	0,175	--
Полупроводники				
Кремний	1 412	3,0	112,7	0,2—0,26
Германий	936	6,2	--	1,14
Арсенид галлия	1 238	6,2	--	0,1
Металлы и сплавы				
Алюминий	660	24,3	68,6	0,538
Медь	1 083	17,3	117,6	0,94
МД15НП		6,2	245,0	
Молибден	2 630	5,4	330,3	0,382
Вольфрам	3 380	4,6	406,7	0,4
Никель	1 453	13,4	193,1	0,22
Ковар 29НК	1 450	5,4	143,1	0,046

Фени-43Н	1 440	6,4	147,0	0,036
----------	-------	-----	-------	-------

Из табл. 3.2 видно, что с сапфиром наиболее близко согласуется по ТКЛР сплав фени-43. Однако лучшим решением этой проблемы является, пожалуй, использование анизотропного двухфазного металлического псевдосплава Мо—Си, имеющего ТКЛР анизотропного монокристаллического диэлектрика. Предпочтительными металлами и сплавами для соединения с ферритами и ситаллами являются ковар, сплавы фени, молибден, вольфрам и сплав МД15НП.

Таблица 3.2

**Основные пары соединяемых материалов
в изделиях электроники**

Область применения	Соединяемые материалы	Разница ТКЛР, $\cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Металлизированный диэлектрик--металл		
Внутриприборные соединения микроплат с корпусами модулей	Керамика А-995—АМЦ	18,1
	Феррит 10СЧ-6—АМЦ	18,2–19,4
	Керамика А-995—МД15НП	0
	Брокерит—ковар 29НК	0,6
	Поликор—сплав АМЦ	17,4
Полупроводник—металл		
Внутриприборные соединения кристаллов с корпусом в транзисторах, диодах, тиристорах, ГИС, полупроводниковых тензометрах, термоэлементах и др.	Кремний—вольфрам	1,6
	Кремний—молибден	2,4
	Кремний—медь	14,3
	Кремний—брокерит	3,0
	Германий—ковар 29НК	0,8
	Германий—МД15НП	0
	Арсенид галлия—МД15НП	0
	Арсенид галлия—медь	11,1
Металл—металл		
Внутриприборные соединения силовых полупроводниковых приборов (тиристоров, транзисторов, диодов), ГИС СВЧ	Вольфрам—медь	12,7
	Молибден—медь	11,9
	МД15НП—медь	11,1
	Ковар 29НК—АМЦ	18,9

Монокристаллический кремний целесообразнее паять с вольфрамом, хотя ТКЛР последнего не полностью соответствует ТКЛР кремния и с понижением температуры до -100°C разница ТКЛР возрастает до $2,8 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Германий обычно паяют с коваром. Однако ТКЛР

германия и арсенида галлия лучше согласован с ТКЛР сплава МД15НП, поэтому последний применяют для соединения с полупроводниками.

Металлизированная бериллиевая керамика также используется в полупроводниковых устройствах, в частности, она может служить в качестве теплоотводящего основания корпуса для мощных транзисторов. Преимуществом бериллиевой керамики перед другими керамиками является ее высокая теплопроводность. Кроме того, она имеет ТКЛР, равный ТКЛР германия и арсенида галлия и незначительно отличающийся от ТКЛР кремния. Однако бериллиевая керамика используется ограничено из-за высокой стоимости и большой токсичности в процессе обработки. Если для германия и арсенида галлия существуют металлы и диэлектрики, ТКЛР которых хорошо согласован с ТКЛР этих полупроводников, то для кремния таких материалов еще не создано.

Большинство легкоплавких припоев, применяемых для создания неразъемных соединений в изделиях электроники, изготовлены на основе легкоплавких металлов, таких как олово, индий, свинец и пр. Эти металлы и их сплавы имеют ТКЛР значительно более высокий, чем у большинства конструкционных материалов, например полупроводников, ферритов и керамики. Поэтому повышение физической совместимости припоев с паяемым материалом за счет уменьшения разницы их ТКЛР является трудной задачей. Одной из причин разрушения паяных соединений полупроводник—металл, диэлектрик—металл является снижение пластичности припоя при минусовых температурах. В связи с этим одним из путей повышения физической совместимости припоя с паяемым материалом является выбор припоя с требуемыми механическими свойствами. При большой разнице ТКЛР паяемого материала и припоя последний должен иметь по возможности более низкий модуль упругости, высокую пластичность и предел текучести, меньший предела прочности на растяжение конструкционного хрупкого материала (полупроводника или диэлектрика). Физическую совместимость припоя с паяемым материалом можно также повысить путем повышения прочности переходной зоны (интерметаллидной прослойки или прослойки твердых растворов) [2]. Кроме того, в процессе пайки и при эксплуатации паяных изделий в паяном соединении происходит активное физико-химическое взаимодействие компонентов припоя с паяемым материалом, которое может снижать прочность соединения из-за большой скорости растворения паяемого материала и образования интерметаллидных соединений.

3.2. Методы оценки паяемости материалов

Паяемость— это способность материала смачиваться расплавленным припоем и образовывать качественное паяное соединение. Паяемость зависит от свойств паяемых материалов, режимов пайки. С точки зрения технологии пайки паяемость — это отношение паяемых материалов и припоя к основным процессам, происходящим при пайке (нагрев, плавление, смачивание, капиллярное течение, раствороно-диффузионное взаимодействие, кристаллизация и др.). Таким образом, паяемость зависит не только от физико-химической природы металлов и припоя, но и от способа и режима пайки, от флюсоющих сред, условий подготовки паяемых поверхностей и т.д.[35].

Для образования паяного соединения необходимо смачивание поверхности основного металла расплавом припоя, что определяет возможность дальнейшего образования между ними химических связей. При физической возможности образования соединения его надежность гарантируется с технологической точки зрения при условии выполнения оптимальных режимов процесса пайки. Паяное соединение должно также обеспечивать герметичность со и требуемую прочность при различных температурах работы изделия.

Смачивание материала заключается в замене межатомных связей в твердой фазе образование металлической, ковалентной или иной связи атомов основного материала с припоем на границе раздела между ними. Физически смачивание проявляется в растекании жидкого припоя по поверхности нагретого материала до установления равновесия сил поверхностного натяжения. Количественными характеристиками смачивания являются угол смачивания θ , растекания - коэффициент растекания Kp , которые определяются из соотношений:

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{1,3} - \sigma_{2,3}}{\sigma_{1,2}}, \quad (3.1)$$

$$Kp = Sp / So, \quad (3.2)$$

где $\sigma_{1,2}$, $\sigma_{2,3}$, $\sigma_{1,3}$, - поверхностные натяжения на границах раздела соответствующих сред; Sp , So - площади растекания и исходной заготовки припоя соответственно (ГОСТ 23904 - 76).

Отличной паяемости соответствуют значения $\theta < 10$, $Kp > 1$, хорошей $10 < \theta < 25$, удовлетворительной и $\theta < 90$. Коэффициент растекания по формуле (3.2) зависит от массы исходного припоя и не дает наглядного представления о характере изменения паяемости, а метод определения достаточно трудоемок.

Для количественной оценки паяемости L. Pessel [36] предложил фактор растекания P :

$$P = 100 \cdot (D - H) / D, \quad (3.3)$$

где D - диаметр сферы, имеющий объём, эквивалентный используемому припою; H - высота капли припоя.

Если отсутствует сила тяжести, то капля припоя будет иметь форму сферы, где D будет эквивалентно H и фактор растекания равен 0. Это свидетельствует об отсутствии паяемости. Качественная оценка паяемости покрытий в соответствии с параметрами смачивания и растекания приведена в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Критерии оценки паяемости

Фактор растекания	Паяемость	Величина угла смачивания, вычисленная по площади растекания
60	Очень плохая	50°
60 – 70	Плохая	50–34°
70 – 80	Удовлетворительная	34–12°
80 – 90	Хорошая	12–3°
90	Отличная	3°

Учитывая, что в реальных условиях пайки высота "лежащей" капли расплавленного припоя H_{np} всегда меньше диаметра гипотетической сферы припоя D , для расчета коэффициента растекания припоя K_p предложено выражение [37]:

$$K_p = \frac{H_{np} - H_k}{H_{np}}, \quad (3.4)$$

где H_{np} - высота "лежащей" капли расплавленного припоя, определяемая как:

$$H_{np} = \frac{\sqrt{2\sigma(1 - \cos \theta)}}{\rho g}, \quad (3.5)$$

где ρ - плотность припоя.

По данной методике отличной паяемости соответствует $K_p = 1$ и появляется возможность контролировать процесс растекания по высоте капли припоя. При испытаниях на растекание гальванических покрытий

со значительными окисными плёнками было показано, что припой растекался под ними, что затрудняло контроль площади. Отсюда следует, что испытания на площадь растекания не подходят для состаренных толстых покрытий.

По критерию паяемости все многообразие современных паяемых материалов различной физико-химической природы можно классифицировать в следующие основные группы: легкопаяемые, среднепаяемые, труднопаяемые и непаяемые (табл. 3.4) [38].

Таблица 3.4.

Классификация материалов по паяемости

Группа материалов по паяемости	Материалы	Угол смачивания, град	Коэф. растекания, Кр	Технологические условия пайки
Легкопаяемые	Sn, In, Au, Ag, Pd, Cu	0–12	0,98–0,80	Канифольные флюсы, вакуум
Среднепаяемые	Pb,Zn,Fe,Ni,Ni-Fe, Cu-Sn,Cu-Zn	5–20	0,82–0,60	Активиров. флюсы Восстановительная атмосфера
Труднопаяемые	Al, Mg, Si, Ti, Mo, Ta, сплавы	2–60	0,6–0,5	Активные флюсы специальные припой
Непаяемые	Стеклокерамика, керамика, ферриты	120–160		Металлизация поверхности

Методы оценки паяемости классифицируют на следующие виды: капиллярное проникновение припоя, растекание припоя, погружение в припой, время смачивания. Критическая оценка методов испытаний позволяет правильно выбрать материалы для получения высокой надёжности контактных соединений и оценить оптимальные параметры операций пайки (табл.3.5).

Таблица 3.5

Применение методов испытаний на паяемость

Испытываемые материалы и компоненты	Методы испытаний			
	Капиллярное проникновение	Растекание	Погружение	Время смачивания
Припой	■	■	■	■
Флюсы	■	■	■	■
Материалы соединений	■	■	■	■
Покрытия	□	■	■	■

Проводники плат	–	□	■	■
Металлизированные отверстия	■	–	□	■
Выводы компонентов	–	□	■	■

■ – высокая достоверность, □ – невысокая достоверность результатов

Паяемость материалов оценивают различными методами: определением смачивающей способности припоев, например замером площади растекания припоя или краевым углом смачивания; определением глубины проникновения припоя в зазор горизонтального типа или высоты подъема припоя в капиллярном зазоре при вертикальном расположении образца; измерением усилия, действующего на образец основного металла, частично погруженного в расплав припоя.

3.3. Оценка паяемости погружением в расплав

В этом методе небольшая ванна с припоем, заданного состава и чистоты, эксплуатируется при постоянной температуре. Тестируемый компонент, офлюсованный и подогретый погружают в расплавленный припой с заданной скоростью на заданную глубину, или он плавает на поверхности припоя определённое время и потом также извлекается с известной скоростью. Это самый простой из всех методов оценки паяемости. Сложность метода заключается в субъективности последующей видимой оценки степени смачивания.

Поверхность установки компонентов лучше всего держать в зажиме или пинцете из нержавеющей стали и, полностью погружать во флюс, используемый в производственном процессе. Любые капли излишка флюса удаляются фильтрованной бумагой. После того, как оксидная плёнка снята с поверхности припойной ванны, образец погружается в припой. Погружение можно выполнять вручную, но лучшая стабильность результатов достигается с помощью контролируемых механических аппаратов, обеспечивающих постоянную скорость погружения от 20 до 25 мм•с⁻¹ [39].

Рекомендуемые времена полного погружения приведены в табл.3.6. Для многих электронных компонентов исследуемые области могут быть погружены не менее чем на 2 мм ниже припойного мениска, как у компонента с вертикальной плоскостью, как показано на рис.3.1. Когда учитывается тепловое сопротивление изделий, то большие плоские компоненты, такие как керамические микросхемы-носители, погружаются таким образом, чтобы не подвергаться термическому

нагреву через их толщину. В таком случае компонент предпочтительно держать на поверхности припоя.

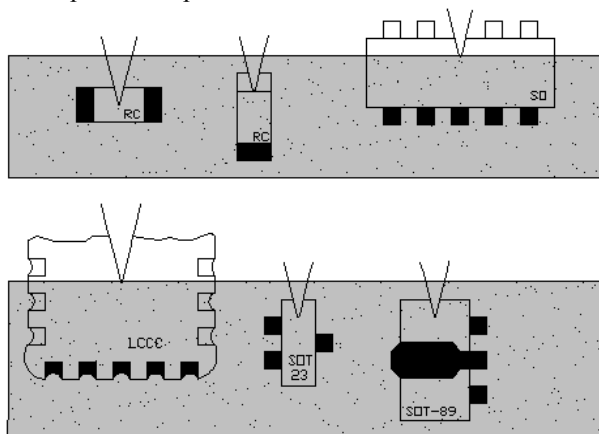


Рис. 3.1. Контроль паяемости SMD методом погружения

Припой для метода погружения имеют составы: 60Sn-40Pb, 63Sn-37Pb, или 62Sn-36Pb-2Ag, которые наиболее часто используются в производстве. Если компоненты имеют выводы, покрытые чистым оловом, возможно расхождение между результатами метода погружения и производственными процессами, такими как парофазная пайка при 215°C , с нагревом ниже точки плавления олова. Условие (а) 3 с при 215°C позволяет тестировать компоненты при относительно низкой температуре, обычно используемой для парофазной пайки. Условие (b) 2 с при 235°C – обычная оценка пригодности к пайке сборок на печатных платах волной припоя, условия (c) и (d) предназначены для оценки смачиваемости компонентов и погружения в волну припоя.

Метод погружения прост в реализации, однако не даёт информации о скорости смачивания, которая может достигаться в течение определённого времени. После удаления из припойной ванны, остатки флюса убираются подходящим растворителем, и паяемые поверхности оцениваются визуально. Поверхности должны быть покрыты ровным и блестящим слоем припоя не более чем с минимальным количеством отдельных недостатков, таких как небольшие отверстия, несмачиваемые или смачиваемые области. Любые недостатки, которые появляются и не должны концентрироваться в одной области. При визуальной оценке требуется покрытие припоем до 95% поверхности и не более чем 5%

несмачиваемой поверхности.

Таблица 3.6

Рекомендуемые условия погружения для испытания на паяемость

Условия испытаний	a	b	c	d
Время погружения, с	3±0.3	2±0.2	5±0.5	30±1
Температура припоя, °С	215±3	235±5	260±5	260±5
Контроль смачиваемости	+	+		
Контроль несмачивания			+	
Контроль нагрева и растворения металлизации				+

Вариант однокомпонентного контроля погружения – это приклеенные и смонтированные компоненты при контроле на паяемую пластину или плату с подходящими припойными площадками, которые после флюсования, медленно погружаются в расплавленный припой при угле 45 градусов. После полного погружения немедленно начинается удаление. Другие погружения происходят при различном времени и минимальное время, необходимое для качественной пайки может быть оценено видимой проверкой. Любые варианты пригодных к пайке партий компонентов могут быть оценены рассмотрением различий паяльных свойств по одному ряду компонентов.

Метод баланса смачивания (Wetting Balance Test) состоит в прямом измерении сил смачивания и работы адгезии. Ванна с припоем 1 движется вверх с помощью привода 2 и эксцентрика 3, при этом в нее погружается исследуемый образец 4, закрепленный на датчике 5 (рис. 3.2,а). Датчик тензометрического типа преобразует усилие в электрический сигнал, который усиливается тензометрическим усилителем 6 и подается на самописец 7. Пока образец не нагрет, смачивание отсутствует, мениск припоя вогнут вниз, на образец действует только выталкивающая сила припоя F :

$$F_a = S h g, \quad (3.6)$$

где S - площадь образца, h - глубина погружения.

При полном смачивании в точке В значение силы смачивания равно F_1 , при отрыве образца в точке С сила смачивания достигает F_2 (рис. 3.2,б). Скорость погружения образцов выбирается в пределах 0,2–0,4 мм/с, время погружения 4–5 с, глубина 0,8–2,0 мм. Мерой паяемости служат сила F_1 и время t_1 , за которое она достигает этого значения. Косинус краевого угла смачивания находят по формуле:

$$\cos \theta = (F_1 + F_a) / F_2 \quad (3.7)$$

Этот метод введен в европейские и международные стандарты (MIL-DIN-JIN-IPC) и применяется для оценки паяемости широкого круга покрытий, образцов печатных плат, чиповых компонентов, эффективности активированных флюсов и бессвинцовых припоев [40,41].

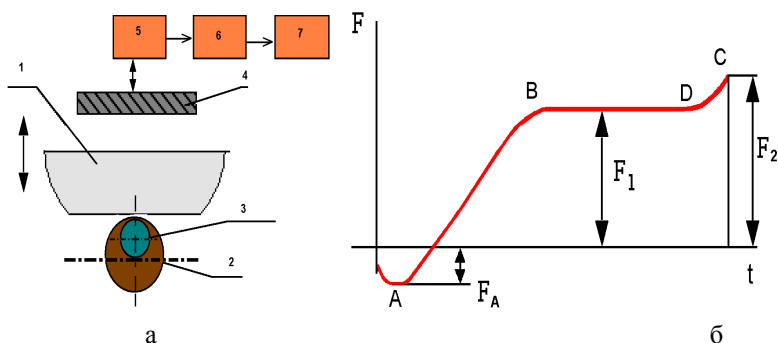


Рис. 3.2. Схема (а) и кривая (б) менискографического контроля паяемости компонентов

Менискографы выпускаются фирмами Metronelec (Швейцария), General Electric (Англия) [42]. Менискограф MeniscoST60 Wetting Balance (рис. 3.3) обеспечивает глубину погружения образцов в расплав припоя от 0,1 до 1,0 мм с шагом 0,1 мм со скоростью от 1 до 50 мм/с. Время выдержки и наблюдения составляет от 1 до 30 с. Хорошей смачиваемости компонентов соответствуют значения силы поверхностного натяжения припоя от 350 до 450 мН.

Тензометрический метод контроля паяемости позволяет изучать процессы смачивания длительностью не менее $1 \cdot 10^{-3}$ с и чувствительностью $5 \cdot 10^{-5}$ Н. Точность измерения f_0 составляет $\pm(2-3)$ %, $\tau \pm 5$ %, угла смачивания ± 1 %, $\sigma \pm(4-5)$ % [43].

Для определения паяемости выводов компонентов применяют более простой менискометрический метод, заключающийся в измерении высоты мениска припоя на выводе над зеркалом ванны под действием сил поверхностного натяжения. Высоту мениска над зеркалом припоя измеряют с помощью специальной оптической головки или бинокулярного микроскопа.

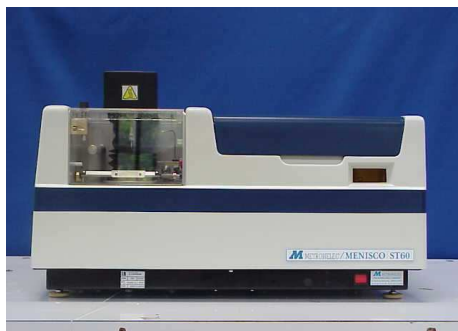


Рис. 3.3. Менискограф MeniscoST60 Wetting Balance

Менискометры выпускаются фирмой Metronelec (Швейцария) с диапазоном измерения высоты подъема мениска 0–1,5 мм с погрешностью $\pm 0,05$ мм. Производительность контроля - до 30 шт/час. Метод - трудоемок, обладает значительной погрешностью.

3.4. Методы оценки паяемости по капиллярному проникновению и по площади растекания припоя

Испытания на капиллярное проникновение используют для оценки влияния зазора соединения, активности флюса или состава припоя. Капиллярное пространство создается между двумя плоскими металлическими листами (рис.3.4,а). Соединяемые поверхности листов флюсуют, подогревают и погружают в ванну с расплавленным припоем на определенное время. После чего листы извлекают, охлаждают и измеряют капиллярный подъем припоя.

Для оценки паяемости применяют нахлесточные или уголковые образцы, образующие горизонтальный зазор. Коэффициент проникновения K припоя в зазор горизонтального типа в присутствии флюса определяется по формуле [36]:

$$K=3l^2/2td, \quad (3.8)$$

где l —глубина проникновения припоя; d — зазор между образцами; t — время испытаний.

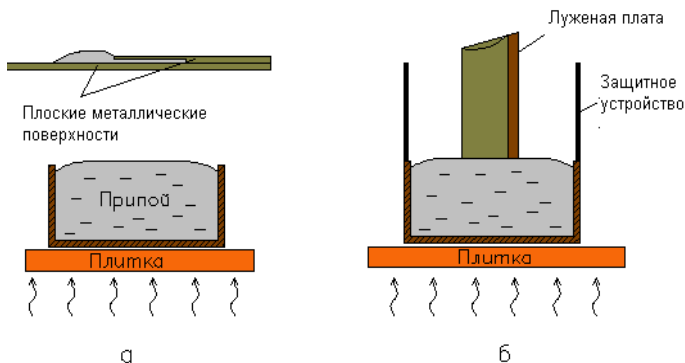


Рис. 3.4. Испытание на капиллярное проникновение между плоскими металлическими поверхностями (а) и лужеными платами (б)

Припой в капиллярном зазоре при вертикальном его расположении поднимается на высоту H : $H = (2\gamma \cos \theta) / R \rho g$, где γ — поверхностное натяжение припоя; θ — угол смачивания; R — радиус капилляра. Скорость течения в капилляре выражается соотношением:

$$\frac{\partial l}{\partial t} = \frac{R \sigma}{4 \eta l}, \quad (3.9)$$

где l — расстояние, на которое припой проник в капилляр за время t ; η — вязкость припоя. Интегрирование выражения (3.9) дает:

$$l = \left(\frac{\sigma \cdot \cos \theta}{\eta} \right) R t. \quad (3.10)$$

Коэффициент проникновения припоя в данном случае равен:

$$K = \left(\frac{\sigma \cdot \cos \theta}{\eta} \right). \quad (3.11)$$

Если в процессе капиллярного проникновения припой должен вытеснять жидкий флюс, то коэффициент проникновения равен:

$$K = \frac{\sigma_{np.\phi} \cos \theta}{2(\eta_{np} + \eta_{\phi})}, \quad (3.12)$$

где η_{np} , η_{ϕ} — вязкость припоя и флюса.

Таким образом, значение коэффициента проникновения прямо пропорционально поверхностному натяжению припоя, косинусу угла

смачивания и обратно пропорционально вязкостям припоя и флюса.

Вследствие окисления металлических поверхностей или изменений в активности флюсов во время предварительного нагрева могут быть аномальные результаты. Несмотря на эти аномалии, для качественного контроля электролитически лужёных плат (рис. 3.4,б) образцы плат сгибают для образования капиллярного пространства. Испытываемые образцы флюсуются при обычной температуре и затем вертикально погружаются в ванну на 1 мин. После удаления и охлаждения образца согнутый край отрезается. Образец выпрямляется, и измеряется высота подъёма припоя. Чувствительность такого качественного испытания низкая, так как он лишь демонстрирует различие в капиллярном подъёме припоя от "хорошего" до "плохого" в интервале 0,2–0,4 см при полном подъёме 3 см.

Измерение капиллярного подъёма припоев выполняют с помощью металлических трубок, сгибанием проволок и с помощью внутренних замкнутых пространств (рис. 3.5). В случае согнутых проволок растягивание проволоки при погружении в расплавленный припой может вызвать неконтролируемое изменение в размерах капиллярных зазоров.

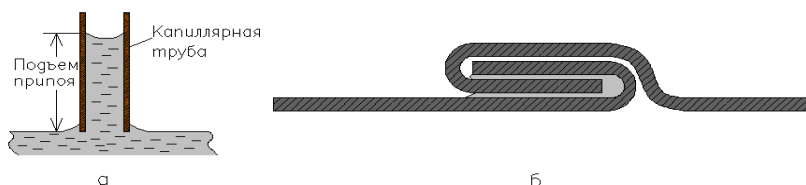


Рис 3.5. Испытание на проникновение припоя в трубах (а) и в соединении из согнутых проволок (б)

При всех испытаниях на капиллярный подъём, использующих оловянно-свинцовые сплавы, высота подъёма припоя в значительной степени зависит от наличия эвтектики в сплаве припоя, и, чем выше процент эвтектики, тем выше капиллярный подъём.

В методе растекания припоя паяемость оценивают измерением площади, которая получается при растекании массы офлюсованного припоя на образце подложки при температуре, превышающей точку плавления припоя, и заданном времени [9]. Однако, он может быть использован и для оценки скорости растекания. На практике неизбежно замедляется термический отклик системы, и контроль области растекания используется для измерения скорости равномерного растекания. Источник тепла убирается только когда растекание фактически закончено. Этот быстрый и простой контроль часто

используется для оценки эффективности ряда флюсов для различных комбинаций подложки и припоя. В этом случае, стандартный размер шарика припоя, расположенного на офлюсованной поверхности, помещается на горячую плиту или предпочтительно в ванну с расплавленным припоем. Площадь растекания после определенного времени оценивается как качественно, так и количественно. Такой метод не приемлем для подложек, покрытых припоем.

Вариант миниатюризации контроля площади растекания подходит для оценки пригодности к пайке выводов компонентов. Окончательная область, смоченная припоем, должна быть меньше чем ширина провода, ограниченная массой припоя, используемого в контроле, несколько десятков мг. Шарик таких размеров сложно подготавливать, обрабатывать и взвешивать, что отрицательно влияет на быстрое выполнение процедуры контроля. Тем не менее, этот контроль области растекания так же подходит для оценки паяемости различных частей выводов или поверхности выводов компонентов.

Если подложка имеет однородный состав со структурной точки зрения, и если сочетание подложки, флюса и припоя такое, что происходит смачивание, то после плавления припой будет в виде сферической крышки, размеры которой определяются как на рис. 3.6. Контур жидкости не сферический потому, что вершина поверхности выравнивается гравитационной силой, направленной вниз. Этот эффект возможно значительно, когда интерпретируется стандартный крупномасштабный контроль области растекания, но для микро контроля натяжения поверхности ошибка составляет менее чем на 1% от диаметра смачиваемой припоем области.

Если масса шарика припоя M и плотность ρ , то объём сферической капли припоя V :

$$V = \frac{M}{\rho} = \frac{1}{6} \pi h (h^2 + 3b^2) \quad (3.13),$$

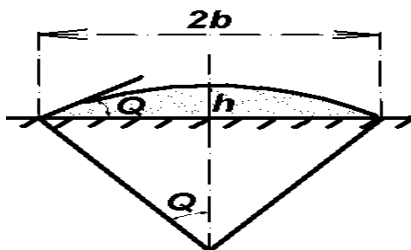


Рис.3.6. Растекание расплавленной капли припоя

где h —высота капли; $2b$ —диаметр площади растекания.

Размеры h и b связаны с контактным углом θ :

$$\frac{h}{b} = \frac{1 - \cos \theta}{\sin \theta} \quad (3.14)$$

Комбинируя выражения (3.13) и (3.14) получим [8]:

$$\frac{M}{\rho} = \frac{\pi b^3}{6} \left[\left(\frac{1 - \cos \theta}{\sin \theta} \right) \left\{ \left(\frac{1 - \cos \theta}{\sin \theta} \right)^2 + 3 \right\} \right] \quad (3.15),$$

из которого, для известного размера шарика припоя угол может быть определён из диаметра $2b$ площади растекания. Некоторые рассчитанные значения из выражения (3.14) показаны на рис. 3.7, связывающего степень растекания припоя с контактным углом подходящего интервала для тестируемой поверхности монтируемых выводов компонентов.

В методах контроля площади растекания используют безразмерный фактор растекания, который выражается, например, соотношением диаметра площади растекания припоя D и объёма припоя V . В этом случае фактор растекания $S=2b/D$, где $V=1/6\pi D^3$ откуда, приравняв этот V с выражением (3.14) для сферической капли, фактор растекания может быть вычислен как функция от угла растекания, как показано на рис. 3.8. Другой фактор растекания, который используется здесь, определяется как $S=(D-h)/h$, где D и h остаются такими, как и были определены выше. На практике значение $2b$ может быть измерено на застывшем припое в предположении, что периферия не изменяется во время застывания. Размер h не может быть измерен после затвердевания, так как вершина будет меняться в довольно непредсказуемом направлении во время затвердевания, так как объём припоя сокращается.

Изменяемый объём припоя во время кристаллизации составляет около 4%, и далее падает около 1–2% во время охлаждения в твёрдом состоянии до комнатной температуры.

Как правило, на электронных компонентах, площадь растекания не будет округлой потому, что имеются неоднородности структуры поверхности в атомном масштабе. В таких случаях, любые другие размеры диаметра $2b$ могут быть сделаны в соответствии заданным осям или область может быть измерена, а средний диаметр соприкасающихся областей вычислен по $2b-(4*\text{область}/\rho)^{1/2}$. Область может быть измерена любой автоматической системой оптического формирования изображений с помощью компьютера, или с

использованием области сравнивающих устройств, которые доступны и пригодны для использования со стереомикроскопами.

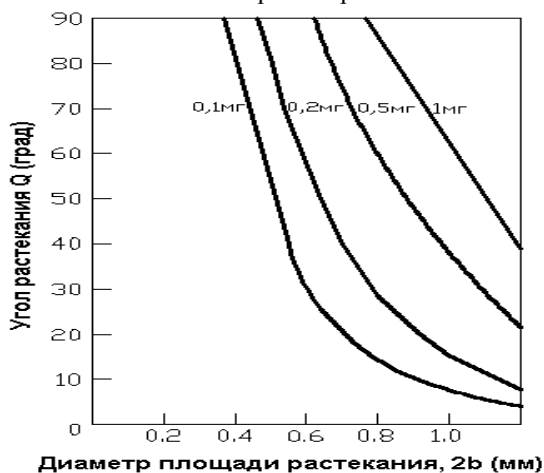


Рис. 3.7 Зависимости контактного угла от диаметра площади растекания и массы припоя

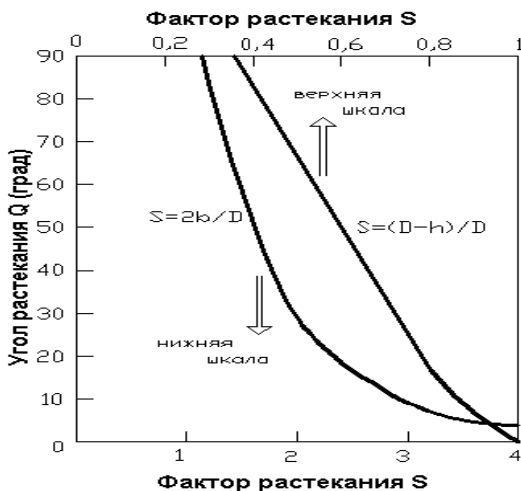


Рис. 3.8. Факторы растекания по площади и углу

Классификация качества смачиваемости по величине контактного угла приведена в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Классификация смачиваемости в зависимости от контактного угла

$0^{\circ} - 10^{\circ}$	идеальная
$10^{\circ} - 20^{\circ}$	отличная
$20^{\circ} - 30^{\circ}$	очень хорошая
$30^{\circ} - 40^{\circ}$	хорошая
$40^{\circ} - 55^{\circ}$	достаточная
$55^{\circ} - 70^{\circ}$	низкая
$70^{\circ} - 90^{\circ}$	очень низкая
$90^{\circ} < \theta$	не смачиваемая

Европейский стандарт NF89400 дает следующую градацию паяемости в зависимости от угла смачивания, приведенную в табл. 3.8.

Таблица 3.8

Классификация паяемости в зависимости от контактного угла

Класс паяемости	Качество паяемости	Величина угла смачивания
1	отличное	до 30°
2	хорошее	до 40°
3	среднее	до 55°
4	плохое	$55^{\circ} < \theta$

Для измерения высоты капли припоя после растекания предложен принцип бесконтактного измерения высоты капли припоя с помощью индуктивного преобразователя [44] (рис. 3.9). Для этого применены два индуктивных преобразователя 1 и 2, два высокочастотных генераторы 3 и 4, смеситель 5, интегратор 6 и регистрирующий прибор 7. Балансная схема включения генераторов позволяет компенсировать изменение частоты в результате нагрева индуктивных преобразователей и повысить точность измерений. Регистрирующий прибор измеряет разностную частоту, получаемую в смесителе. В осевом отверстии катушки индуктивного преобразователя жестко закреплена игла 8 из материала, смачиваемого припоем 9, для центрирования капли припоя относительно датчика [45]. Игла устанавливается на исследуемую поверхность образца 10, длина иглы должна превышать высоту капель припоя при полной несмачиваемости поверхности.

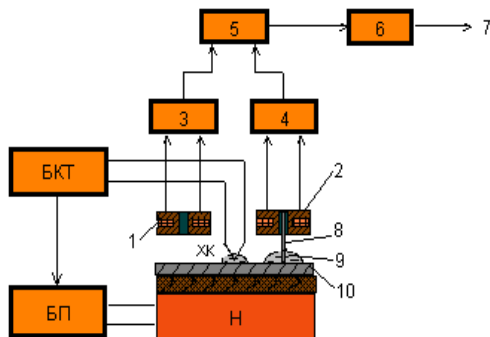


Рис. 3.9. Схема бесконтактного измерения высоты капли припоя

Припой расплавляется резистивным нагревательным элементом Н, на котором размещаются исследуемые образцы. Контроль температуры осуществляют с помощью термопары типа ХК, погруженной в дозированную навеску припоя на образце-свидетеле, и подключенной к электронному измерителю температуры БКТ, который стабилизирует температуру процесса. Перед началом испытаний в центре образца с покрытием наносят навеску припоя дозированной массы 250 мг и дозированный объем флюса 0,01 мл. Индуктивный преобразователь располагают на плоской заготовке припоя таким образом, чтобы игла фиксировала осевую симметрию преобразователя и заготовки припоя. Секундомером фиксируют начало и конец растекания припоя, а высоту капли припоя определяют по показаниям прибора.

Обработка данных ведется с помощью ПС-контроллера и вывода информации на светодиодные индикаторы. Для повышения точности измерений, а также с целью исключения температурного фактора в преобразователе разработанного прибора использованы две идентичные катушки индуктивности и частотомер на микроконтроллере КР1878ВЕ1 (рис.3.10,а). В микроконтроллере шестнадцатиразрядный таймер-счетчик имеет восьми битный предварительный делитель и трех битный счетчик переполнения, что в сумме составляло 27 разрядов. Быстродействие микроконтроллера зависит от максимальной измеряемой частотой сигнала 50 МГц. Секундный интервал отсчитывается с помощью программно организованных циклов, в которые введена динамическая индикация показаний. По окончании счета значение измеренной частоты получается опросом регистров из шестнадцатиразрядного таймера-счетчика и трехразрядного счетчика переполнения. В устройстве применены 3 трехразрядных светодиодных

индикатора серии АЛС318. Для повышения стабильности генератор образцовой частоты выполнен на ИМС КР1554ЛАЗ, питаемой от отдельного стабилизатора КР142ЕН5А.

Для регулирования и поддержания температуры нагревателя на заданном уровне применен электронный регулятор мощности А2. Особенностью прибора является наличие встроенного блока контроля температуры UZ2, что позволило отказаться от громоздкого внешнего измерителя температуры и уменьшить габариты (рис.3.10,б).

Основными параметрами прибора являются: разрешающая способность по высоте капли припоя, который определяется чувствительностью прибора и стабильность задания образцовой частоты. Точность определения коэффициента растекания в 1,5 раза выше, чем по стандартной методике.

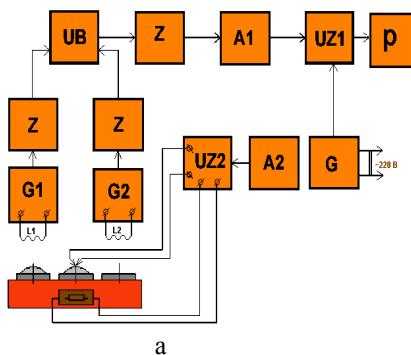


Рис. 3.10. Схема (а) и внешний вид (б) прибора оценки паяемости покрытий

Высота капли припоя выражается в делениях шкалы, а для перехода к коэффициенту растекания построена специальная диаграмма.

3.5. Методы оценки паяемости по времени смачивания

Для контроля характеристик смачивания и растекания припоя по паяемой поверхности предложен ультразвуковой метод, основанный на особенностях распространения ультразвуковых волн в пластинах образцов, контактирующих с жидким припоем [46]. Установка для определения способности припоя к смачиванию ультразвуковым методом (рис. 3.11) состоит из ультразвукового дефектоскопа УДМ–1М

с излучающим 1 и приемным 2 датчиками; самопишущего прибора Н-110 для регистрации изменений величины амплитуды ультразвуковых импульсов, прошедших через зону испытания образца; самопишущего потенциометра ПСР1-01 с термопарой типа ХК для измерения температуры образца, электропаяльника 3 типа ПЭТ-50 с терморегулятором РТП-2М. Излучение и прием УЗ волн в исследуемых образцах осуществляли методом сквозного озвучивания на частоте 1,8 МГц с помощью датчиков гребенчатого типа. Синхронная регистрация изменений величины амплитуды УЗ импульсов и температуры образца была достигнута за счет механического привода от прибора Н-110 к потенциометру ПСР1-0,1.

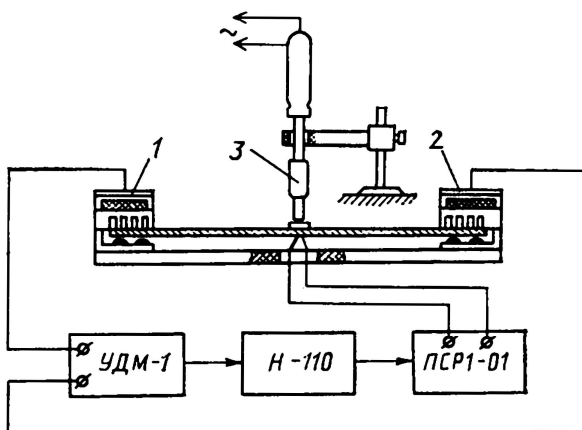


Рис. 3.11. Схема установки для определения паяемости ультразвуковым методом

Анализ совмещенных кривых синхронной записи изменений во времени температуры образца T и величины амплитуды УЗ импульсов A (рис. 3.12) показывает, что началу физического контакта между расплавом припоя и поверхностью образца соответствует момент времени t_3 , когда амплитуда импульсов начинает резко уменьшаться. Этот момент характеризует минимальную температуру, при которой начинается смачивание. Дальнейшее увеличение температуры в зоне испытаний в течение временного интервала t_3-t_4 приводит к растеканию припоя, что выражается ослаблением амплитуды импульсов до значения A_4 .

Результаты определения минимальной температуры смачивания медных и стальных образцов размером 100x20x1,5 мм расплавами

оловянно-свинцовых припоев с флюсом «Прима-2» приведены в табл. 3.9.

Реальная чувствительность ультразвукового метода зависит от минимальной площади контакта расплава припоя с поверхностью образца в зоне испытаний, которая должна быть не менее 4—6 мм². Для получения стабильных результатов эксперимента расстояние между датчиками выбирается не менее 40 мм.

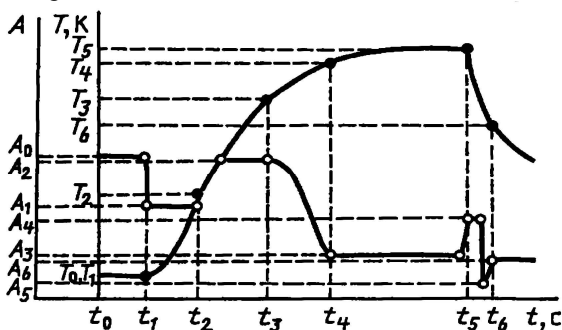


Рис. 3.12. Временные зависимости температуры образца и амплитуды УЗ импульсов, прошедших через зону испытаний

Анализ данных табл. 3.9 показывает, что для оловянно-свинцовых припоев минимальная температура смачивания при времени смачивания 2–3 с достижима при перегреве припоя на 60 градусов. С повышением процентного содержания олова в припое минимальная температура смачивания снижается до 185–190°С.

Таблица 3.9

Минимальные температуры смачивания припоями типа ПОС

Тип припоя	Температура перегрева припоя выше ликвидуса	Минимальная температура смачивания	
		медь М1	сталь 20
ПОС30	20	228	237
	60	225	239
	100	230	240
ПОС40	20	208	215
	60	203	207
	100	207	212
ПОС61	20	185	190
	60	180	185
	100	186	193

3.6. Паяемость гальванических покрытий

Основным показателем оценки паяемости гальванических покрытий, рекомендованным отраслевыми стандартами, является коэффициент растекания припоя K_p . Паяемость определяется на образцах-спутниках размером 25Ч25Ч1 мм, изготовленных из исследуемого материала с покрытием (рис. 3.13, а). Образцы 1 предварительно обезжириваются в органическом растворителе, твердый припой 3 прокатывается до толщины листа 0,3мм, доза его в виде диска диаметром 8мм вырубается с помощью штампа или пробойника. Температура испытаний устанавливается на 65—70°С выше температуры ликвидуса припоя. Время испытаний не более 3с. После испытаний на образце микрометром измеряется высота капли 2, площадь смачивания рассчитывается по среднему диаметру растекшейся капли припоя. Паяемость считается удовлетворительной, если коэффициент растекания составляет не менее 0,9, а высота растекшейся капли припоя не более 0,6 мм.

Для определения угла смачивания на образец-спутник 1 укладывают предварительно облуженную в припое ПОС61 медную проволоку диаметром 0,5—0,8 мм и длиной 15—20 мм. На проволоку наносят пипеткой две капли флюса объемом 0,025 мл каждая и включают нагрев. После оплавления слоя припоя на проволоке и образования паяного шва образец снимают с установки и охлаждают. Угол смачивания определяют на срезе образца, перпендикулярном оси (рис. 3.13, б).

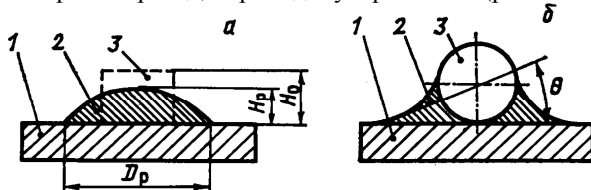


Рис. 3.13. Схема определения коэффициента растекания припоя (а) и угла смачивания (б)

Паяемость считается удовлетворительной, если угол смачивания составляет не более 30°.

Исследования паяемости металлических покрытий, используемых в электронике, в зависимости от искусственного старения в течение 24 ч в атмосфере насыщенного водяного пара при 100°С и старения в нормальных условиях в течение 6 месяцев показали, что наилучшую

паяемость имеет горячее лужение оловом или сплавом олово—свинец [47]. Установлено, что паяемость большинства гальванических покрытий при старении уменьшается в результате: потускнения их поверхности вследствие образования сульфидных и окисных пленок под воздействием атмосферы; диффузии металла покрытия в основной металл, что приводит к уменьшению толщины покрытия; диффузии основного металла в покрытие, что служит причиной окисления или коррозии покрытия.

Покрытия из благородных металлов (золота, палладия, родия) характеризуются высокой паяемостью и устойчивостью в агрессивной атмосфере, однако из-за высокой стоимости этих металлов применяются очень тонкие (1–3 мкм) их слои, которые не предотвращают диффузию металлов из основы, что ухудшает пайку покрытых деталей после продолжительного хранения (например, латунных). Кроме того, тонкое покрытие из благородного металла легко растворяется в расплавленном припое. В связи с этим целесообразно покрытия золотом, платиной, палладием, серебром корпусов и выводов интегральных схем, полупроводниковых приборов и других изделий электронной техники заменять покрытием из менее дефицитных и более дешевых сплавов на основе олова, никеля и других металлов.

Стойкость серебряного покрытия во многом зависит от его пористости [48]. Чем выше пористость, тем быстрее развивается коррозия и образуются сернистые соединения серебра типа Ag_2S . К ускоренной коррозии серебряных покрытий приводит также наличие в атмосфере озона, хлора, сернистых соединений. Для развития процессов коррозии и образования соединения Ag_2S , препятствующего пайке, достаточно 5 мм^3 паров сернистых соединений в кубометре воздуха. Источником серы являются оберточная бумага, картон упаковочных коробок для радиоэлементов, а также клеящий состав липких лент, используемых при машинной установке элементов на плате. При опрессовке элементов из пресс-порошка могут выделяться пары хлористого водорода, хлористого винила и фенола, вступающие в реакцию с гальваническим серебряным покрытием выводов. Линолеумные и поливинилхлоридные покрытия полов в помещениях выделяют серу, хлор и другие летучие вещества.

Качественная пайка деталей, имеющих серебряные покрытия и не прошедших специальной обработки, возможна в присутствии спирто-канифольного флюса не более чем после 10–15 суток складского хранения. Для сохранения паяемости в течение более длительного срока (до 2,5 лет) рекомендуется проводить обработку покрытий в

водном растворе ингибитора с упаковкой в конденсаторную бумагу.

Существуют два основных метода определения коррозионной стойкости гальванопокрытий — качественный и количественный. Оба метода без увеличения или с увеличением в 50–200 раз устанавливают факт наличия или отсутствия зон коррозии, их распространенность и интенсивность. Качественный метод реализуется визуальным и микроскопическими способами. При количественном методе оценка коррозионной стойкости может определяться: интервалом времени, через который появляются первые очаги коррозии; изменением механических и электрических свойств, отражательной способности покрытий; числом коррозионных очагов на единице площади; изменением массы или толщины покрытия при условии удаления продуктов коррозии.

Наиболее правильное представление о коррозионной стойкости покрытий дают полевые испытания в естественных условиях, однако их продолжительность очень велика. Поэтому в производственных условиях предпочтительны ускоренные коррозионные испытания в специальных камерах или сосудах, с помощью специальных паст.

Гальванические покрытия оловом и сплавом олово — свинец сразу после осаждения имеют хорошую паяемость, однако вследствие рыхлой и пористой структуры покрытий в процессе хранения протекает диффузия цинка из латунной основы к поверхности. Поэтому способность к пайке таких покрытий значительно ухудшается в течение трех месяцев складского хранения. Оловянно-цинковые и оловянно-висмутовые гальванические покрытия обладают хорошей паяемостью и сохраняют способность к пайке в течение более длительного времени. Исследования показали, что снижение паяемости оловянно-цинкового покрытия на 25% наблюдается через 9 месяцев складского хранения, а у оловянно-висмутового — через три года хранения [49].

Значения коэффициентов растекания припоя ПОС 61 по площади и по высоте капли приведены в табл. 3.10 [50]. По результатам замеров K_p установлено, что отличной паяемостью обладают оловянное, золотое, серебряное покрытие, а также покрытия сплавами Sn-Ni, Pd-Ni. Хорошие результаты отмечены для покрытий Pd, Sn-Pb и Cu. По никелевым сплавам спиртоканифольные флюсы имеют низкую активность, а также образуют трудно удаляемые остатки на паяемых поверхностях [51]. Для увеличения активности по медным и никелевым поверхностям необходимо использовать активированные флюсы на основе этиленгликоля, содержащие поверхностно-активные

вещества и активаторы в виде щавелевой кислоты и гидрохлоридов производных бензиламина. Такие флюсы обладают в 1,6–2,0 большей активностью, чем флюс ФКСп, а его остатки легко удаляются с поверхности деталей промывкой в теплой проточной воде.

Таблица 3.10

Коэффициенты растекания припоя ПОС 61 по покрытиям

Тип покрытия	Состав, %	Коэффициент растекания,	
		по площади	по высоте, %
Оловянное	100 Sn	4,0–5,0	96–97
Золотое	100 Au	3,0–3,5	94–95
Серебряное	100 Ag	1,5–2,0	87–89
Сплав Pd-Ni	1,5 In, ост. Pb	1,4–1,5	87–88
Сплав Sn-Ni	3,5 Ni, ост. Sn	1,4–1,6	92–95
Сплав Sn-Pb	50 Sn, ост. Pb	1,2–1,3	80–83
Палладиевое	100 Pd	1,2	8–82
Медное	100 Cu	1,2	78–80
Никелевое	100 Ni	1,0	70–75

Исследование паяемости серебряных покрытий проводили методом определения коэффициента растекания дозированной заготовки припоя ПОС 61 массой 250 мг в присутствии спиртоканифольного флюса при температуре $220 \pm 5^\circ\text{C}$. Применяемый флюс содержал по массе 25% канифоли и 75% изопропилового или этилового спирта. Испытанию предшествовало ускоренное старение, которое проводилось при $155 \pm 5^\circ\text{C}$ в течение 16 часов. После проведения ускоренного старения образцы выдерживали в нормальных климатических условиях не менее 2 и не более 24 часов [52].

Результаты исследований паяемости серебряных покрытий показали, что некоторое ухудшение паяемости покрытий серебро–ультрадисперсный алмаз наблюдается лишь при 15 г/л УДА в электролите. По значению коэффициента растекания больше 80% паяемость композиционных серебряных покрытий можно считать хорошей.

Исследования различных типов покрытий для печатных плат на паяемость, проведенные С.Ж. Thwaites [53] в зависимости от их старения в условиях воздействия влаги и атмосферы с сернистыми соединениями, приведены в табл. 3.11. Наилучшие результаты отмечены для гальванических покрытий оловом и сплавом олово–никель толщиной 20–30 мкм. Оплавлением свежесажденных гальванических покрытий, например, с помощью инфракрасного

излучения можно значительно улучшить паяемость и увеличить стойкость к окислению. При этом совершенствуется структура покрытия, которая по своим свойствам приближается к структуре металлургического сплава.

Таблица 3.11.

Параметры смачивания и растекания припоя для покрытий печатных плат

Покрытие	Время смачивания, с		Площадь растекания, см ²	
	Среда SO ₂	Среда H ₂ S	Среда SO ₂	Среда H ₂ S
Олово	<0,2	0,2	>5	>5
Олово–свинец	<0,2	<0,2	>5	>5
Химическое олово	>10	>10	0	0,4
Золото	<0,2	<0,2	0,7	0,6
Химическое золото	>10	>10	0,3	0
Серебро + золото	10	0,4–1,0	0,7	0,6
Олово–никель-золото	0,3	0,2	0,6	0,7
Олово–никель	>10	13	–	–
Олово–никель +никель	1,0	0,24	–	–

– не исследовано

Результаты исследований смачивания металлических покрытий на меди М1 припоем ПОС 61 в присутствии флюса ФГСп при температуре 230 ± 10 °С тензометрическим методом приведены в табл. 3.12 [43].

Таблица 3.12

Параметры смачивания металлических покрытий для пайки

Покрытие	$F_0 \cdot 10^{-3}$, Н/м	θ , град	Время смачивания, с
Гальванический никель	2,80	54	0,12
Химический никель	2,60	58	0,14

Гальванический никель с блескообразующими добавками	2,40	60	0,23
---	------	----	------

Лучше всего смачиваются гальванические никелевые покрытия, наличие до 3% фосфора в химическом покрытии, а также его пористость, замедляют смачивание и увеличивают угол смачивания до 58 град. Хуже всего смачивается гальваническое покрытие с блескообразующими добавками с высокой чистотой поверхности, в результате чего увеличивается время релаксации смачивания и угол смачивания до 60 град.

3.6. Паяемость электронных компонентов

Для проверки на паяемость материалов выводов электронных компонентов J.A. ten Duis (Philips) предложил **метод шарика припоя** (glob test) (рис. 3.14.,а) [36]. На нагретый столик 4 укладывают дозу припоя, которая расплавляясь, образует каплю 2. К капле подводят проводник 3, который делит ее на две части. По мере нагрева вывода и припой начинает его смачивать и обтекать. В момент полного смыкания над выводом припоя касается зонда 1 и отсчет времени прекращается. Такие приборы выпускаются фирмой Multicore (Англия).

Для контроля паяемости металлизированных отверстий в печатных и многослойных платах измеряют время заполнения их припоем с помощью таймера, связанного с зондом (рис. 3.14,б). Для этого плату 1 приводят в контакт с припоем 2, при этом включается таймер. Постепенно поднимаясь по стенкам отверстий и смачивая их за счет капиллярного эффекта, припой касается зонда 3 и отключает тем самым таймер.

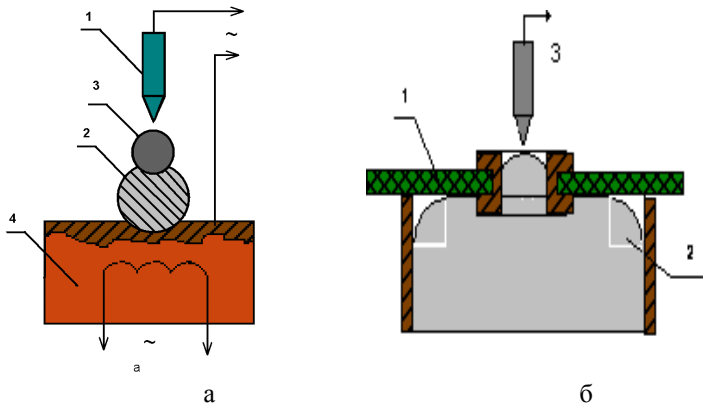


Рис. 3.14. Методы контроля паяемости по времени смачивания: выводов компонентов (а) и металлизированных отверстий (б)

Для этих целей фирма Multicore выпускает универсальный прибор со сменной головкой на различные диаметры в платах, снабженный принтером и стандартным интерфейсом. Производительность контроля составляет до 150 отверстий в час. При времени смачивания более 3 с паяемость отверстий считается неудовлетворительной [54].

Для контроля паяемости выводов и широкого круга корпусов компонентов: от 0402 до больших интегральных схем QFR и BGA в соответствии с требованиями известных мировых стандартов: МЭК 68-2-69, IPC/ANSI/ J-ST-002/3, NF89400 может быть применен тестер контроля паяемости Menisco ST88 (рис. 3.15), который обладает высокой точностью перемещения образца (0,1%), регулируемой скоростью 1–50 мм/с, поддерживает температуру до 450°C и обеспечивает погружение образцов в припой на глубину от 0,02 до 25 мм [55].

При подготовке к пайке элементов и деталей с ухудшенной паяемостью возникают трудности при лужении паяемых поверхностей (несмачивание их припоем), а при введении дополнительной операции зачистки поверхностей увеличиваются длительность и трудоемкость процесса лужения. При подготовке выводов радиоэлементов к пайке перспективна активация расплавленного припоя УЗ колебаниями. При этом в припое возникают интенсивные кавитационные процессы, разрушающие пленки окислов и других соединений на обслуживаемых поверхностях и увеличивающие химическую активность припоя и паяемой поверхности.



Рис. 3.15. Тестер контроля паяемости Menisco ST88

На партии резисторов типа МЛТ, имеющих серебряное покрытие и хранящихся в течение 24 месяцев в картонной коробке, было определено время смачивания в присутствии 20%-ного спиртоканифольного флюса. Для оценки времени смачивания использовали установку АП-6048, предназначенную для измерения времени смачивания вывода в капле припоя. Паяемость выводов из-за потемнения серебряного покрытия оказалась неудовлетворительной [56].

Применение активных флюсов типа ЛТИ-120 и механической зачистки выводов улучшило паяемость и сократило время смачивания до 1 с, однако эти методы либо трудоемки, либо не допустимы по существующим требованиям, предъявляемым к технологическому процессу лужения изделий (табл. 3.11).

Выводы резисторов МЛТ, которые имели неудовлетворительную паяемость в припое ПОС61, при ультразвуковом лужении в модернизированной ванне УЗВЛ-0,4 в течение 2 с полностью восстановили паяемость. Слой припоя на выводах был ровным, блестящим, без пор и несмоченных участков. Эффективным оказалось также применение УЗ лужения для выводов конденсаторов К50, К53, диодов 2Б503А, имеющих серебряное покрытие, микросхем в корпусе типа DIP и блоков резисторов Б20 с покрытием горячим лужением.

Таблица 3.11

**Паяемость выводов резисторов с серебряным покрытием
после 24 месяцев хранения**

Вид обработки	Среднее время смачивания, с	Оценка паяемости
Флюсование ФКСп	11,3	Неудовлетворительная
ФГСп	3,9	Плохая
ЛТИ-120	1,0	Удовлетворительная
Механическая зачистка, флюсование ФКСп	0,63	Хорошая
УЗ лужение в припое ПОС 61	0,25	Отличная

Таким образом, применение УЗ колебаний позволяет осуществлять бесфлюсовое лужение паяемых поверхностей элементов и деталей с высокой производительностью и восстанавливать паяемость покрытий после длительного срока хранения, а также снизить трудоемкость подготовки их к монтажу.

Глава 4. ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ И ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СОЕДИНЕНИЙ

4.1. Лужение поверхностей соединяемых деталей

С освоением групповых механизированных процессов пайки печатного монтажа возникла проблема паяемости монтажных элементов. Ее возникновение обусловлено разнородностью применяемых металлов и металлопокрытий, их пористостью, разными сроками и условиями хранения, различной стойкостью к воздействию внешней среды, а, следовательно, и различной паяемостью. Серебряные покрытия на выводах элементов и печатных проводниках после непродолжительного хранения тускнеют и теряют паяемость при пайке с использованием флюсов, не вызывающих коррозии.

В начале 60-тых годов различная паяемости монтажных элементов приводила к низкому качеству электромонтажных соединений после групповой механизированной пайки, что сопровождалось значительным браком соединений, достигающим 5–6 %. В дальнейшем проблема восстановления и сохранения паяемости получила значительное развитие. Разработаны методы и средства оценки паяемости, позволяющие исключить поступление на сборку деталей, имеющих низкую паяемость. Для повышения и восстановления паяемости применяются [10]:

- декапирование электролитических покрытий из таких металлов, как медь, серебро и золото, если этому не препятствуют конструктивные особенности элементов;
- оплавление электролитических покрытий погружением в нагретые до 240—260⁰С глицерин или флюс марки ФДГл, что эффективно для легкоплавких покрытий такими металлами и сплавами, как олово, олово—висмут, олово—свинец или олово—никель;
- лужение в оловянно-свинцовых или оловянно-свинцово-висмутовых припоях.

По сравнению с декапированием и оплавлением лужение является универсальным, наиболее эффективным и широко распространенным способом. Наряду с восстановлением паяемости металлопокрытий лужение обеспечивает высокую паяемость элементам без каких-либо покрытий, выполненных из стали, кобальта, никеля, латуни и других металлов. Более того, лужение в оловянно-свинцовых припоях является пока единственным способом удаления золотых покрытий с выводов навесных элементов и тем самым исключает опасность образования

интерметаллидов и охрупчивания соединений.

Типовой технологический процесс лужения монтажных элементов, печатных плат и конструктивных деталей содержит следующие операции: флюсование облуживаемых поверхностей, лужение, удаление излишков припоя, отмывку остатков флюса, сушку. Процессы лужения выполняются вручную электропаяльниками и механизированными способами – погружением в припой или в волну припоя. Лужение поштучно электропаяльником применяют при малых партиях деталей и при исправлении дефектов механизированного группового лужения.

При всех способах процесс лужения производится при регламентированных основных параметрах режима, которыми являются температура и время лужения. Эти параметры, а также состав флюсов и припоев устанавливаются в зависимости от конструктивных особенностей и стойкости облуживаемых элементов к тепловым нагрузкам, флюсам и растворителям для удаления их остатков.

Оптимальные параметры режимов и марки присадочных материалов для лужения различных монтажных и конструктивных элементов приведены в табл. 4.1 [10]. Применение припоев ПОСВ 33 и ПОСК 50-18 позволяет значительно снизить температуру лужения для ГПК на основе лавсана, что исключает расплавление и ухудшение изоляционных свойств, а при лужении МПП погружением или волной припоя снижает тепловой удар и опасность разрыва межслойных соединений в платах.

При групповом лужении погружением или волной припоя поверхность монтажных элементов покрывается слоем припоя различной толщины, а металлизированные отверстия печатных плат полностью заполняются припоем. Излишки припоя удаляются вручную с помощью ракеля или встряхиванием, а также механизировано с помощью центрифуги.

Удаление излишков припоя ракелем применяется преимущественно при лужении контактных площадок и не защищенных масками печатных проводников одно- и двусторонних печатных плат без металлизированных отверстий. Процесс состоит в том, что после извлечения из ванны лужения печатная плата с одной или обеих сторон с помощью ракеля освобождается от излишков жидкого припоя до начала его кристаллизации, наступающей через 2—3 с после завершения лужения. Очевидно, что процессы лужения и удаления излишков припоя быстротечны и неразрывны во времени, требуют от исполнителя быстроты действий и известного мастерства, которые в значительной мере определяют качество покрытия.

Таблица 4.1

Элементы, материалы и режимы лужения

Монтажные и конструктивные элементы	Марки материалов		Режимы	
	Флюса	Припоя	Температура, °С	Время, с
Концы одно- и многожильных проводов и кабелей, выводов	ФПЭт,	ПОС61, ПОС 61М	250–260	1 – 4
ГПК, лепестки и штыри, армированные пресс-материалами	ФКТ, ФКСп,	ПОСВ 33, ПОСК 50-18	170–190 180–200	2 – 3
Штырьковые и планарные выводы микросхем и полупроводниковых приборов	ФКЭт	ПОС 61	240–250	1 – 2
Выводы более теплостойких элементов	ФКЭт, ФСкПс	ПОССу 61-0,5 ПОССу 50-0,5	250–270	2 – 3
Монтажные элементы печатных плат и МПП	ФГСп, ФСкПс, ФДФс, ФТС	ПОС 61, ПОСВ 33	250–260 180–190	2 – 3
Конструктивные детали	ФГСп, ФСкПс, ФДГл	ПОССу 61-0,5 ПОССу 50-0,5	250–270	3–5
Детали из алюминиевых сплавов	ФТБф	ПОЦ 10, ПОЦ 20, ПОЦ 30	200–250 280–300 320–350	2–4

Способ встряхивания применим для различных конструкций обслуживаемых элементов, включая печатные платы с металлизированными отверстиями. Состоит он в том, что излишки жидкого припоя до начала их кристаллизации удаляются резким, но не сильным ударом захвата, который удерживает обслуживаемый элемент, о край ванны лужения или о резиновый валик. Качество покрытия при этом зависит от мастерства исполнителя, а механизация затруднена.

Способ центрифугирования состоит в том, что излишки жидкого припоя удаляются с облуженных поверхностей под действием центробежных сил. В отличие от вышерассмотренных этот способ исключает применение ручных приемов труда, оздоравливает его условия, поддается автоматизации и гарантирует стабильное высокое качество покрытия, которое уже не зависит от мастерства исполнителя. Кроме того, центрифугирование излишков припоя позволяет в определенных пределах регулировать толщину покрытия за счет изменения частоты вращения вала центрифуги.

Для удаления излишков легкоплавкого сплава Розе, а также припоев ПОСВ33, ПОСК50-18 при лужении печатного монтажа применяется еще один механизированный способ, исключающий ручные приемы труда. Он состоит в том, что излишки припоя удаляются с печатной платы, извлекаемой из ванны со скоростью 1–2 м/мин струями жидкого теплоносителя (глицерин, масло), нагретого до температуры 140–180°C, который подается под давлением до 0,6 МПа. Этот способ имеет широкие возможности для получения высококачественного покрытия и регулирования его толщины.

Операция лужения выводов электронных компонентов в технологическом процессе сборки радиоэлектронной аппаратуры во многом определяет надежность паяных соединений. Однако существующие технологические процессы лужения не обеспечивают полностью высокого качества покрытия из-за невозможности применения таких активных флюсов как ЛТИ–120, вызывающих впоследствии коррозию выводов элементов и микросхем. Поэтому для получения покрытия без использования каких либо флюсов были проведены работы по определению возможности лужения выводов микросхем с применением ультразвука.

Предварительные исследования показали, что для обеспечения эффективности УЗ лужения расстояние между поверхностью излучателя и обрабатываемой поверхностью выводов микросхем не должно превышать 2 мм. Кроме того, непременным условием процесса УЗ лужения является наличие защитной среды в зоне лужения. Это связано с тем, что под воздействием УЗ колебаний происходит интенсивное окисление поверхности припоя и часть образующихся окислов остается на выводов микросхем после лужения. Оптимальная амплитуда смещения торца излучателя при УЗ лужении составляет 10 мкм. Лужение выводов микросхем проводят припоями ПОС 61, ПОСК 50-18 и другими.

УЗ колебания, введенные в расплав припоя, изменяют его гидродинамическое и тепловое состояние, что приводит к изменению температуры нагрева выводов микросхем в процессе их лужения. Тепловое воздействие на микросхему оценивалось по температуре на концах вывода, расположенного внутри корпуса микросхемы. Значение температуры измерялось с помощью термоиндикаторов плавления, изменяющих свой цвет при достижении определенной температуры. Так как температура нагрева корпуса зависит от материала вывода, были исследованы микросхемы в корпусах типа “Тропа”, 401МС8 и 101СТ14. выводы этих микросхем выполнены соответственно из меди, кобальта и никеля.

В ходе испытания были определены зависимости температуры нагрева выводов микросхем от времени лужения, температура припоя и способа лужения (рис. 4.1). Максимальное время лужения выводов микросхем составляло 5 с, хотя нормативными документами оно ограничено двумя секундами. Количество микросхем в каждой из партии, на основании которых определялись экспериментальные точки, составляло пять штук.

Анализ данных показал, что для всех выбранных типов корпусов микросхем температура нагрева их выводов при УЗ лужении по сравнению с лужением без ультразвука увеличивается на 10–16°C, что равносильно повышению температуры припоя на 20–30°C. Таким образом применение ультразвука позволяет снизить температуру припоя, благодаря чему облегчается его защита от окисления.

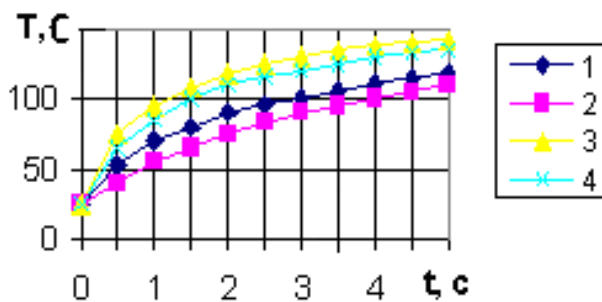


Рис. 4.1. Зависимости температуры нагрева вывода микросхемы внутри корпуса от времени лужения: 1 – с ультразвуком при 160°C, 2 – с флюсом при 160°C, 3 – с ультразвуком при 240°C, 4 – с флюсом при 240°C

Оптимальные технологические параметры УЗ лужения выводов микросхем: амплитуда ультразвуковых колебаний, 10 мкм; частота ультразвуковых колебаний 44 кГц \pm 0,15%; расстояние между излучающей поверхностью концентратора и выводов микросхемы (1,5 \pm 0,5) мм; расход защитной среды – аргона $3 \cdot 10^{-5}$ м³/с [57].

Время лужения определяется временем достижения максимально допустимой температуры нагрева выводов микросхем. Качество лужения при этом соответствовало технологическим требованиям. Таким образом, УЗ бесфлюсовое лужение выводов микросхем обеспечивает требуемое качество покрытия, исключая при этом флюсование и очистку, что снижает трудоемкость на 50–70%.

4.2. Методы флюсования при пайке соединений

К вспомогательным операциям процесса групповой пайки относятся: обезжиривание, нанесение маски, флюсование, удаление маски, отмывка флюса, сушка и контроль. При обезжиривании плату погружают в органический растворитель на 7–10 с так, чтобы верхняя сторона покрывалась слоем растворителя на 0,5–1 мм.

Защитные маски одноразового пользования штампуют из бумажной ленты, покрытой клеем, смачивают водой с помощью пульверизатора, плотно прижимают к плате на 2–4 мин. После пайки платы бумажная маска удаляется промывкой в горячей воде. Маски многоразового использования изготавливают из нержавеющей стали, их прижимают к плате с помощью уплотнений из термостойкой резины.

В настоящее время применяют защитные компаунды, которые являются маской в процессе пайки, а также влагозащитным покрытием. В состав компаундов включают эмаль, полимеризующий агент, вазелиновое масло. Жизнеспособность компаунда 3 часа.

На облуживаемые поверхности флюсы наносятся вручную с помощью кисти, дозатора или механизировано накаткой роликами, погружением во флюс, жидкой или пенообразной волной флюса. Флюсование кистью или дозатором применяется при лужении небольших партий деталей, а также при исправлении дефектов механизированного группового лужения с помощью электропаяльников.

Групповой способ накатки флюса применяется для флюсования монтажных элементов ГПК, шлейфов и печатных плат. Независимо от способа нанесения флюса процесс должен, обеспечивать сплошное

смачивание флюсом всей обрабатываемой поверхности монтажного элемента. Флюс должен наноситься без избытка, но в количестве, достаточном для последующего лужения заданной поверхности.

Процесс флюсования поверхностей монтажных элементов негерметичных сборок должен исключать затекание флюса внутрь и попадание его на поверхности контактов разъемов и реле. На облуживаемые поверхности концов проводов и кабелей флюс наносится не ближе, чем в 3 мм от торца изоляции.

Флюсование печатных плат осуществляют следующими способами: погружением в ванну с флюсом, вращающимися щетками, напылением, волной или с помощью пены [8]. Нанесение флюса погружением - малопроизводительно, не обеспечивает однородного и равномерного покрытия флюсом платы, требует строго выдерживать глубину погружения платы во флюс. Поэтому этот метод используется в индивидуальном и мелкосерийном производстве.

Нанесение флюса вращающимися щетками обеспечивает механизацию процесса флюсования (рис. 4.2). Однако нерабочие части щеток, не погруженные во флюс, при остановке устройства засыхают, ворс на них слипается.

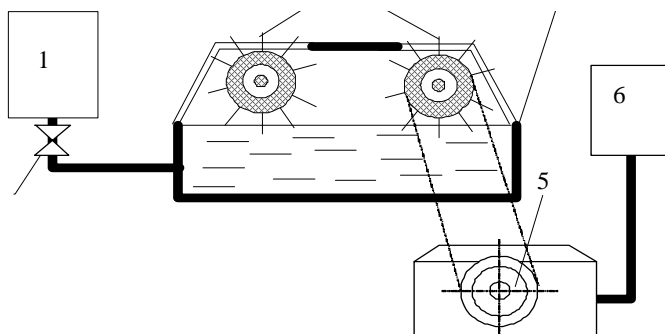


Рис. 4.2. Схема нанесения флюса вращающимися щетками: 1 - емкость с флюсом, 2 - вентиль, 3 - щетки, 4 - ванна с флюсом, 5 - редуктор, 6 - электродвигатель

Нанесение флюса методом напыления с помощью одной пары сопел при расстоянии до платы 300 мм обеспечивает флюсование плата шириной до 100 мм. Для более широких плат применяют 2, 3 и более пар сопел. В установке для нанесения флюса напылением (рис. 4.3) флюс из резервуара 1 поступает через кран 2 в электромагнитный

клапан 3 и оттуда в регулируемое жиклерное устройство 4 и дозирующее сопло 5 пульверизатора. Отсюда флюс захватывается потоком воздуха, выходящим из воздушного сопла 6 пульверизатора. Сжатый воздух подается через регулятор давления 9 и ресивер 10. Магистраль 8 служит для продува каналов клапана, жиклеров и сопла при их засорении остатками флюса.

Оборудование для нанесения флюса в виде пены (рис. 4.4) состоит из внутреннего 1 и наружного 2 резервуаров, соединенных между собой таким образом, чтобы жидкий флюс 3 свободно перетекал из одного отсека в другой. Во внутреннем резервуаре установлены жестко связанные между собой вспенивающие элементы 4, выполненные из пористых материалов (керамики, фетра, войлока) в виде дисков, трубок. При подаче через отверстие в элемент 4 сжатого воздуха флюс во внутреннем резервуаре вспенивается выходящим воздухом в виде "шапки пены" 7 и поднимается над резервуаром.

Наружный резервуар закрывается сеткой 8, которая способствует ускоренному превращению пены снова в жидкость. Для поддержания равномерного уровня поверхности пены над выходным отверстием используют вертикальные щетки 6. Расход флюса восполняется из емкости 9. Весьма важным фактором для образования равномерного по высоте гребня пены является однородность размеров ячеек пористого материала, из которого изготовлены вспенивающие элементы 4.

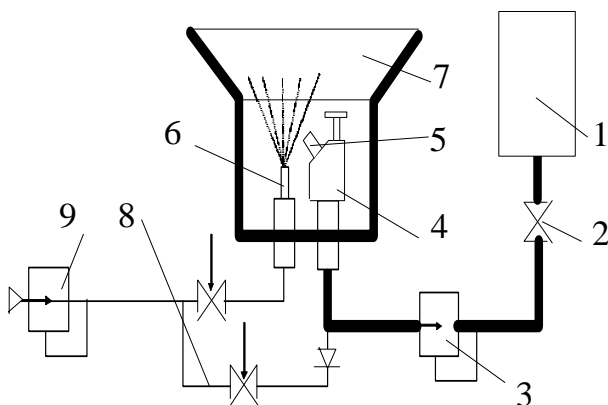


Рис. 4.3. Схема нанесения флюса распылением

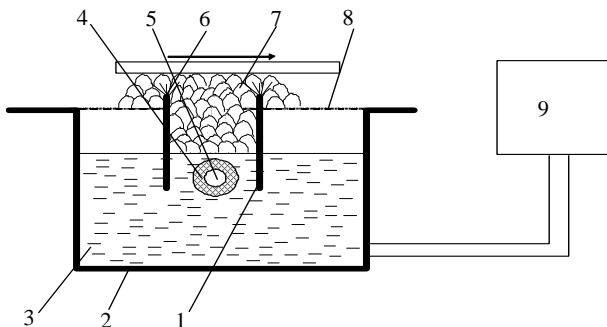


Рис. 4.4. Нанесение флюса в виде пены

В устройстве для образования волны флюсующей жидкости (рис. 4.5), подача флюса осуществляется с помощью вращающейся крыльчатки 1 связанной с электродвигателя 2 жидкость в виде стоячей волны 4 на выходе канала 5 флюсующего состава. Регулирование высоты волны осуществляется изменением числа оборотов электродвигателя. Скоростной напор потока флюса позволяет покрывать флюсом не только нижнюю сторону платы, но и обеспечивает проникновение ее в металлизированные отверстия многослойных плат. Излишки флюса удаляются с платы щеткой. В ванну 7 флюс подается через вентиль из емкости 8. Недостатками являются: сложность устройства, увеличенные габариты линии пайки.

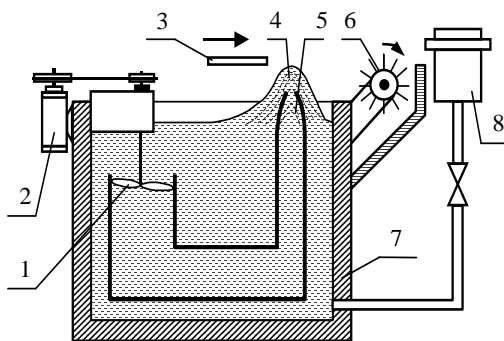


Рис. 4.5. Схема устройства для образования волны флюса

Подсушка флюса перед пайкой в сочетании с предварительным подогревом печатных плат во многом определяет качество паяных

соединений, особенно в крупносерийном и массовом автоматизированном производстве. Поскольку в состав флюсов в качестве растворителей входят спирт и вода с температурой кипения 80° и 100°C соответственно, то при соприкосновении жидкого флюса с расплавленным припоем при температуре $230\text{--}250^{\circ}\text{C}$ происходит бурное кипение флюса с образованием значительного количества газов и паров. За счет этого в припое образуются газовые раковины и паровые "карманы", приводящие к пористости соединения. Кроме того, поверхностные слои припоя, контактирующие с жидким флюсом за счет его испарения существенно охлаждаются, что ухудшает смачиваемость поверхности печатных плат.

Поэтому важно при подсушке флюса добиться полного испарения растворителя из флюсующего состава. Такая задача решается нагревом нижней (паяемой) поверхности плат до температуры 85°C , если растворителем служит спирт, и до 100°C , если растворителем является вода. В результате предварительного подогрева плат перед пайкой уменьшается тепловой удар в момент соприкосновения платы с расплавленным припоем, что уменьшает коробление плат, позволяет снизить температуру пайки.

Нагрев плат осуществляют в камерах радиационной сушки (рис. 4.6), где тепловое излучение от нагреваемой (ИК лампы) 1 отражается с помощью рефлектора и направляется на плату. Излишки флюса стекают в сборник 3. Вентилятор 4 создает конвективный поток воздуха. Недостатком подобного устройства является стекание остатков флюса и возникновение дымления, что снижает интенсивность ИК - излучения.

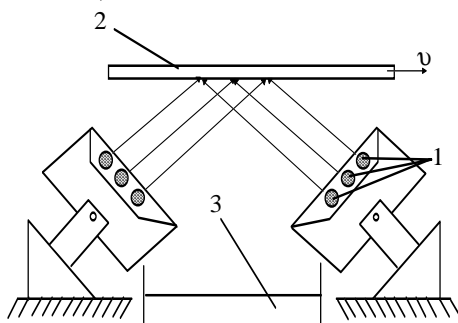


Рис. 4.6. Сушка платы ИК нагревом: 1– ИК - излучатели, 2– плата, 3– сборники флюса

Чтобы избежать этого радиационные излучатели 1 располагают под углом к горизонтальной поверхности платы 2, а для излишков флюса устанавливают специальные сборники 3, которые легко чистить.

Флюсование волной пенообразного флюса, как и жидкого, совершается при участии всей массы флюса в открытой ванне с большой поверхностью испарения летучих составляющих. Пенообразная волна формируется щелевым соплом в результате вспенивания жидкого флюса многочисленными струями воздуха, подаваемого в трубу из мелкопористой керамики под давлением от 0,01 до 0,03 МПа. Из-за перемешивания, продувки воздухом и большой поверхности испарения состав флюса в ванне быстро меняется. Возрастает его вязкость, ослабевает капиллярный эффект, уменьшается количество подаваемого в зазоры флюса, что ведет к снижению качества контактных соединений.

В виду этих сложностей и пока не решена проблема автоматического контроля и поддержания постоянства состава флюса в ваннах с пенообразователями, работающих в составе механизированных линий пайки изделий на печатных платах.

4.3. Дозирование заготовок припоя при массовой пайке

Широкому использованию пайки в массовом производстве способствовал выпуск заготовок припоев в виде закладных деталей, возможности применения которых весьма широки. Однако подобно тому, как для получения хорошего паяного соединения его необходимо специально конструировать под пайку, так и для закладных деталей необходимо рационально их конструировать и изготавливать по оптимальной технологии.

Заготовка припоя представляет собой выпускаемую в больших количествах деталь постоянного веса из припоя, которая может иметь и флюсовую набивку. Свойства закладных деталей делают их удобными для автоматической подачи и массового нагрева.

Применение закладных деталей обладает многими достоинствами. В паяемый узел можно вводить заранее определенные количества припоя и флюса, что позволяет получать исключительно однородные соединения. При ручной пайке количество припоя, введенного в зазор, зависит от квалификации, опыта и внимательности оператора. При использовании закладными деталями достигается более высокая степень однородности паяных соединений, что облегчает их контроль качества. Размещение заготовок припоя легко автоматизировать, в результате

чего эта операция обходится дешево и достигаемая, при этом экономия оправдывает дополнительные расходы на их изготовление.

При использовании заготовок паяемые детали необходимо предварительно фиксировать в определенном положении; иногда закладная деталь вводится в уже горячий собранный узел. Большое значение имеет и метод нагрева, от которого требуется, чтобы детали доводились до температуры пайки в определенной последовательности, гарантируя хорошую смачиваемость и заполнение зазора.

Закладные детали конструируются и изготавливаются в соответствии с геометрией конкретных соединений, намечаемых к пайке. Наиболее широко применяется профилированная проволока, которую выпускают постоянного сечения или из трубчатого припоя. Желательно применять трубку с гарантированным непрерывным флюсовым заполнением, например типа *Sen-Tri-Core*. Для того чтобы реализовать преимущества однородности соединений, необходимо, чтобы закладные детали были свободны от пустот и содержали одинаковое количество флюса. Проволока выпускается в виде сегментов, отрезков, колец и спиралей, петель и других конфигураций.

Детали с просеченными отверстиями изготавливают из плоской ленты с флюсовой набивкой или из заготовки сплошного сечения, придавая им форму дисков, шайб, втулок и т. п. Диски и шайбы с флюсовой набивкой обычно имеют участок сплошного сечения, гарантирующий прочность этой слоистой конструкции. Шарики припоя выпускаются только сплошного сечения.

Металлические детали с покрытием из припоя представляют собой отрезки основного металла, на которые нанесен слой припоя определенной толщины, так что зазор заполняется как припоем, так и этим металлом, служащим для тех или иных целей. Такие детали могут иметь покрытие либо с одной или с двух сторон.

Конструирование деталей под пайку с закладными деталями включает следующие этапы:

- выбор достаточного зазора (до 0,08 мм) для выхода флюса и смачивания;

- проверку закладной детали на правильную посадку в зазор. Если посадка возможна, но требуется строгое соблюдение допусков, то необходимо предусмотреть для улучшения условий сборки фиксирующие или направляющие выступы.

- Введение конструктивных элементов, ограничивающих растекание жидкого припоя, например канавок, буртиков и т. д., так как во время пайки жидкий припой имеет тенденцию либо скапливаться под

действием силы тяжести в наиболее низких участках узла, либо затекать под действием капиллярных сил в узкие места.

– Проверку соединения на равномерность нагрева его деталей до требуемой температуры. Детали массивного сечения нагреваются медленнее тонких, поэтому расположение и мощность источника нагрева играют большую роль. Растекание припоя и смачивание им поверхности возможны лишь на достаточно нагретых поверхностях. Если соединение в целом не нагрето до нужной температуры, то возможно смачивание только одной из его деталей, что ведет к некачественному спаю.

Необходимо избегать появления областей повышенного или пониженного давления вблизи паяного шва до тех пор, пока припой не затвердел. В замкнутых полостях, заполненных газом, при нагреве имеет тенденция роста давления вследствие расширения газов. Если в конструкции узла дренаживание не предусмотрено, то при пайке газ будет прорываться через жидкий припой. В результате спай получается пористым, а сам припой может попасть в нежелательное место. При охлаждении сжимающийся в полости газ создаст подсос, так что припой может затечь в нее. Указанные недостатки можно предотвратить надлежащим нагревом узла, избегая чрезмерного перегрева припоя, и рациональным охлаждением. Далее, для дренажа можно воспользоваться небольшим отверстием, которое, если необходима герметичность соединения, впоследствии запаивают.

Соединение с закладным припоем конструируют в следующей последовательности [9]:

а) Определяют геометрию идеального спаю, руководствуясь соображениями прочности, герметичности, доступности осмотра и т. д.

б) Рассчитывают объем идеального паяного соединения, включая контуры галтелей, используя номограммы, позволяющие определить идеальный объем по величинам, доступным для непосредственного замера (рис. 4.7).

в) Рассчитывают закладную деталь припоя, исходя из ее идеальной величины. Если применяется трубчатая деталь с флюсовой набивкой, то в расчет нужно ввести поправку на объем, занимаемый флюсом. При определении формы детали, наиболее близко подходящей по форме к контурам зазора, необходимо учитывать:

- возможность автоматической подачи закладных деталей в узел;
- удобство ввода деталей различной формы (посадку, зазоры и т. д.);
- способность деталей сохранять приданную им форму (тонкие детали легко изгибаются, разрезные кольца сцепляются одно с другим и т. п.);

–посадку детали на поверхности, через которую передается тепло, что важно для правильного нагрева и смачивания;

–расстояние, на которое должен распространиться расплавленный припой под действием силы тяжести и капиллярных сил.

г) После того как закладная деталь сконструирована, следует изготовить несколько ее образцов и провести их испытания в лабораторных условиях. В качестве эквивалентов колец и шайб могут служить полые валики или другие круглые предметы. Для изготовления дисков и шайб можно воспользоваться фольгой, для имитации шариков — небольшими кусочками проволоки.

Объем любой детали, имеющей цилиндрическую форму, легко вычислить на основе двух ее размеров — диаметра и высоты цилиндра. Объем шайбы определяется как разность объемов дисков большого и малого диаметров, причем последний равен диаметру отверстия. Кольцо образовано изгибом цилиндра, диаметр которого равен высоте кольца. Соответственно высота H определяется как:

$$H = \frac{D_H + D_B}{2}. \quad (4.1)$$

Пример расчета закладной детали. Вал сплошного сечения диаметром $d_B=12,7$ мм нужно соединить с втулкой, имеющей диаметр $d_H=13,0$ мм соответственно, пользуясь закладным припоем с набивкой из активированной канифоли. Высота втулки 6,5 мм. Необходимо рассчитать закладную деталь для пайки данного соединения (рис. 4.7).

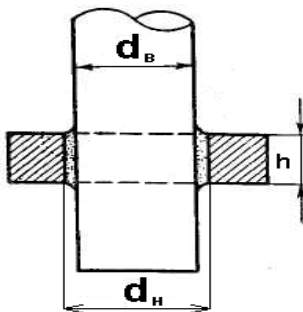


Рис. 4.7. Схема паяного соединения вала с втулкой

а) Идеальный спай в форме шайбы будет иметь следующие размеры: внутренний диаметр $d_B = 12,7$ мм, наружный диаметр $d_H = 13,0$ мм, длина спаи $L = 6,5 + 0,5 = 7,0$ мм (к высоте шайбы добавляется высота мениска галтели).

б) Идеальный объем по наружному диаметру $d_n = 13,0$ мм и $L = 7,0$ мм составит $V_1 = 929$ мм³. При внутреннем диаметре $12,7$ мм и $L = 7,0$ мм объем цилиндра $V_2 = 886$ мм³. Идеальный объем спая:

$$V_c = V_1 - V_2 = \frac{1}{4} \pi L (d_n^2 - d_e^2) = 43 \text{ мм}^3. \quad (4.2)$$

в) Кольцо трубчатого припоя, содержащего флюс в количестве 20%, имеет общий объем $V_k = V_c \times 1,2 = 51,6 \text{ мм}^3$

г) Находим диаметр кольца припоя в соединении

$$d_k = \frac{d_n + d_e}{2} = \frac{13,0 + 12,7}{2} = 12,85 \text{ мм}. \quad (4.3)$$

д) Исходя из рассчитанного объема кольца в форме тора и его диаметра находим диаметр припоя

$$D = \sqrt{\frac{V_k}{2,467 d_k}} = 1,27 \text{ мм} \quad (4.4)$$

Выбираем ближайший стандартный диаметр трубчатого припоя 1,3 мм.

4.4. Ограничение площади растекания припоя

При пайке электронных сборок широко применяют защитные покрытия. По их функциям эти покрытия можно разбить на две основные группы: защитные маски и покрытия для паяных соединений. Защитные маски, обычно из эпоксидных смол, наносят на те участки поверхности детали, на которых смачивание нежелательно. Примером может служить печатная схема с узкими полосками изоляторов и сложно переплетенной схемой проводников, в которой образование металлических перемычек совершенно недопустимо. Если такую схему селективно перекрыть защитным материалом, так что свободными останутся лишь те участки, к которым необходимо припаивать детали, то возможность образования перемычек полностью устраняется.

Экранирующие материалы обычно изготавливаются на базе эпоксидных смол и наносятся наложением пленки, напылением и кистью. Покрытие до пайки необходимо подвергать отверждению, после чего оно может выдерживать рабочие температуры пайки, не теряя своих защитных свойств в течение достаточно долгого времени. Нет необходимости говорить о том, что поверхность перед нанесением

покрытия необходимо тщательно очищать. Не менее важно предварительно проверить совместимость покрытия с используемым флюсом. В некоторых случаях флюсы, несовместимые с материалом покрытия (в особенности с аминами), вызывали отслаивание и разрушение материала маски со всеми вытекающими отсюда последствиями (сказанное относится к большинству не эпоксидных материалов). Маски, служа барьером между атмосферой и печатной схемой, обладают еще и дополнительным преимуществом, устраняя опасность коррозии и утечки тока. Дополнительная стоимость маски компенсируется уменьшением расхода припоя при пайке и тем, что, в случае печатных схем, можно применять медную проводку без оловянно-свинцового или какого-либо другого защитного покрытия.

Одним из самых существенных недостатков масок является то, что в случае их применения ремонт схемы сильно затрудняется. Для того чтобы провести ремонтную пайку, маску необходимо соскоблить или удалить каким-либо другим способом. Большинство выпускаемых промышленностью растворителей для эпоксидных смол вредно действует на другие детали электронного оборудования.

В настоящее время для печатных плат и поверхностного монтажа используют фотоэкспонируемые паяльные маски с водощелочным проявлением, отличающиеся высокой химической стойкостью. Такие маски светло-зеленого или темно-зеленого цвета содержат до 76% твердой составляющей и гарантируют толщину покрытия 25 мкм. Маски после нанесения экспонируют в течение 20–30 с при мощности ламп 5 кВт. Проявление происходит в 1% растворе карбоната натрия, после чего следует тепловое отверждение. Маски выдерживают термоудары в количестве 100 циклов от -65 до + 125°C и стойкость к воздействию припоя в количестве не менее 5 циклов.

Для ограничения количества припоя на печатных проводниках в технологии массовой пайки применяют паяльные маски в виде сухой фотополимерной пленки, наносимой на поверхность платы вакуумным ламинированием и экспонируемой ультрафиолетовым излучением. Маска типа ВАКREL фирмы Du Pont (США) матово-зеленого цвета обладает хорошей адгезией к поверхности платы, устраняет образование перемычек припоя и защищает печатный монтаж от климатических воздействий. Маски выпускаются толщиной 50, 75 и 100 мкм и обеспечивают геометрию паяных соединений с фотографической точностью [58].

В настоящее время в связи с невысокими потребительскими свойствами сухих пленочных паяльных масок возрос интерес к

применению жидких фоточувствительных масок, наносимых сеткографической печатью. Для обеспечения высокой повторяемости рисунка и хорошего разрешения необходимо выполнить ряд требований: рекомендуемый тип сетки—100–125 ячеек на дюйм (39–49 на см), угол наклона ракеля—22,5°, время сушки— не более 70–80 мин при 80°С, толщина маски в сухом виде—10–20 мкм, плотность энергии экспонирования—150–400 мДж/см², время реакции полимеризации после экспонирования —10–15 мин [59]. При обработке печатных плат в установке горячего лужения (HASL), а также при волновой пайке на поверхности маски могут образовываться шарики припоя, приводящие к образованию перемычек. Использование масок с матовой поверхностью снижает количество образующихся шариков припоя.

Защитные покрытия наносятся на выполненные паяные соединения после их тщательной промывки и удаления флюса. Назначением покрытия является сохранение чистоты поверхности после пайки, в особенности в электронных и электротехнических узлах. Химически чистую поверхность паяного узла, полученную после удаления флюса, необходимо защитить от последующих воздействий. Прикосновение потных рук, контакт с запыленной средой, в которой работают бытовые или производственные приборы,— все это может повлиять на качество большинства печатных схем.

Материалы покрытий паяных соединений отличаются от материалов масок тем, что первые благодаря подбору компонентов допускают пайку без удаления покрытия с проводников. Это обстоятельство весьма ценно с точки зрения возможности ремонтной пайки. Защитные покрытия также служат барьером для влаги, и ее конденсация не может повлиять на надежность соединения. В этом отношении они аналогичны лакам, наносимым на электролитически осажденные декоративные покрытия. Наносят защитные покрытия обычными способами — пульверизатором, кистью или погружением. В качестве защитного покрытия применяют химический никель толщиной 3–5 мкм, осаждаемый по селективной технологии.

Защитные покрытия используют не только в электронной промышленности. В конструктивных паяных соединениях серьезную опасность представляет образование электродного потенциала между припоем и основным металлом. В данном случае покрытия служат барьером для влаги, чтобы предотвратить возникновение коррозионных электрохимических элементов. В этом отношении нанесение защитных покрытий аналогично окрашиванию.

4.5. Методы очистки от остатков флюса

Как правило, после пайки на плате остается еще некоторое количество флюса и продуктов его разложения. Они могут вызвать коррозию, ухудшить электрические параметры схемы, деградацию паяных соединений. Необходимость очистки платы после пайки решается в зависимости от требуемой степени надежности аппаратуры, условий ее эксплуатации, назначения изделия. При использовании защитных масел очистка обязательна во всех случаях. Для очистки и промывки плат применяют различные растворители и составы, включая воду. Общее правило при этом заключается в следующем: моющие составы должны быть способны растворять как связующее вещество, так и основной материал флюса.

Удаление остатков канифольных флюсов осуществляют спиртом, спирто-бензиновой смесью, трихлорэтиленом, четыреххлористым углеродом. Однако применяемые жидкости пожароопасны и токсичны. Ранее широкое применение получили фтор- и хлоруглеродистые растворители, обеспечивающие высокую степень очистки. В установке КР-1 очистку плат от канифольных флюсов вели спиртофреоновой смесью (1:10) в ваннах предварительной и окончательной отмывки. Для интенсификации процесса очистки применяли подогрев и циркуляцию мощного раствора.

Большую степень автоматизации очистки платы обеспечивал роботизированный комплекс "Прима-1", в котором автоматически поддерживаются заданные температура и время очистки. В 2-х ваннах предварительной и окончательной очистки непрерывно идет процесс регенерации растворителя, что обеспечивает его полную замену через 2 часа. Содержание канифоля в ванне окончательной очистки не превышает 0,25 %. Очистка проводилась при вибрации промышленной частоты с амплитудой 0,1–1,5 мм. Весь цикл очистки не превышал 5 мин, в том числе предварительная сушка 1–2 мин, выдержка над ванной 0,5 мин, выдержка в каждой ванне 1–2 мин.

Очистка плат после пайки с применением водорастворимых флюсов проводится горячей водой (50–60⁰С) с добавками поверхностно-активных веществ (ПАВ). Очистка на роботизированной линии «Прибой-1» выполняется по следующей схеме: очистка в моющей среде - 10 мин, 60⁰ С, стекание раствора - 0,5 мин, ополаскивание в воде - 5 мин, 60⁰С, ополаскивание в деионизованной воде - 5 мин, 25⁰С, предварительная сушка - 30 мин, 60⁰С, окончательная сушка - 180 мин, 25⁰С. Эта технология позволила без снижения качества избавиться от

спирто-бензиновой и спирто-фреоновой смесей, а также предотвратить загрязнения окружающей среды парами органических растворителей.

Альтернативой органическим растворителям и хладагентам является УЗ очистка в водных растворах ПАВ. Воздействие УЗ полей на жидкие среды вызывает в них процессы кавитации, а также макро- и микропотоки в объеме жидкости, прилегающей к излучаемой поверхности ванны. Захлопывание кавитационных газовых полостей сопровождается образованием ударных микроволн, давления в которых могут достигать $(1-5) \cdot 10^8$ Па. Такие микроудары разрушают не только оксидные пленки и загрязнения на обрабатываемой поверхности изделий, но и в определенной степени изменяют морфологию поверхности. Возникающие микро- и макропотоки способствуют удалению загрязнений и ускорению процесса очистки микрорельефных поверхностей. Обусловленные кавитацией динамические и тепловые эффекты интенсифицируют процесс удаления загрязнений с поверхностей деталей и изделий под действием УЗ поля. Использование рабочих частот в диапазоне 80–120 кГц обеспечивает неразрушающую очистку и удаление загрязнений размером до 1 мкм с микрорельефных поверхностей.

Основными преимуществами УЗ очистки перед другими методами удаления загрязнений являются высокая производительность, сочетающаяся с хорошим качеством очистки изделий от любых поверхностных пленок. Развитие технологии УЗ очистки поверхностей изделий за последние десятилетия показало, что наиболее производительным является групповой способ обработки мелких изделий, уложенных в кассеты или корзины. Для высокого качества очистки необходимо создать направленные акустические течения и обеспечить равномерность распределения интенсивности УЗ поля в объеме жидкости.

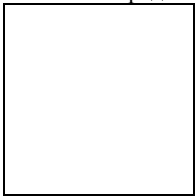
Контроль качества очистки от остатков паяемых флюсов проводят визуальным осмотром под микроскопом типа МБС-2 с увеличением 8-10 раз, а также люминесцентным или кондуктометрическим методами. Люминесцентный метод контроля основан на явлении флуоресцентного свечения веществ, входящих в состав флюсов (канифоли, салициловой кислоты и др.). Источниками излучения при облучении платы являются лампы СВД-129А, ПРК-5 со светофильтром УФС-6. Наличие загрязнений определяют по видимому свечению остатков на поверхности платы в темной камере: голубое - для канифоли марки В и салициловой кислоты, желтое - для канифоли марки А. Точность метода до $1 \cdot 10$ г/см².

Для получения высокого качества отмывки необходимо обеспечить

контроль поверхностных загрязнений. Применяют прямые и косвенные методы определения органических и неорганических поверхностных загрязнений. Так, прямыми методами определяют загрязнения непосредственно на поверхности контролируемых изделий, а косвенные методы основаны на экстрагировании загрязнений растворителя с последующим анализом экстрактов физико-химическими или физическими методами, что позволяет обнаружить весьма малые количества поверхностных загрязнений (табл. 4.2).

Таблица 4.2

Методы контроля поверхностных загрязнений

Метод контроля	Чувствительность, мкг/см ²	Область применения
Люминесцентный: по свечению пленки	8...10	Контроль качества обезжиривания от минеральных масел, канифоли
с применением люминофора	1	Качественный контроль деталей с полированной поверхностью
Анализ экстракта загрязнений в органических растворителях	0,2...0,3	Полуколичественный контроль качества обезжиривания
Кондуктометрический	0,1	Контроль процессов промывки деталей в воде после операций химической обработки
Фотокалориметрический	0,02...0,05	<p>Определение ионов</p>  <p>⁻², SO₄²⁻, PO₄³⁻, NO₃⁻ и др.</p>

Кондуктометрический метод основан на измерении сопротивления дистиллированной воды до и после контрольной отмытки в ней проверяемых флюсов. Кондуктометрическим методом проводят контроль наличия остатков флюса путем измерения сопротивления дистиллированной воды до и после контрольной отмытки в ней проверяемых флюсов. Отмытую электронную сборку погружают в дистиллированную воду при температуре 20±5°C и ополаскивают в течение 5 мин. Промывную воду помещают в стакан емкостью 500–800 см³, куда погружают датчик и измеряют с помощью

кондуктометрического концентромера КК-2 или КК-3 удельное сопротивление воды. Допускается снижение сопротивления до значения не более $20 \cdot 10^3 \text{ Ом/см}^3$.

Для экспресс контроля качества промывки применяют устройство, которое удаляет воздух из потока жидкости и концентрирует механические примеси в контрольном потоке, повышая тем самым чувствительность прибора к малому содержанию загрязнений в основном потоке жидкостей. Наиболее надежным в эксплуатации является вихревой метод, заложенный в основу конструкции разделительного аппарата—гидроциклона.

Автоматизация контроля трихлорэтилена по содержанию жировых загрязнений достигается применением лабораторного малогабаритного электронного флуорометра ЭФ-ЗМА, в которой вмонтирована стеклянная проточная кювета, связанная с анализируемым прибором пробоотборником и позволяющая измерять степень флуоресценции. На основании полученных результатов относительная погрешность не превышает 10%. Остатки канифоли на плате определяют качественной реакцией Шторха — Моравского.

Наиболее перспективными методами контроля чистоты поверхности и технологических сред являются методы, использующие различие физико-химических свойств чистой и загрязненной поверхностей. Одним из таких методов является трибометрический метод.

Для количественных и качественных измерений загрязнений после очистки плат наибольший интерес представляют прибор фирмы Protonique (Швейцария) и его аналог Alpha metals (Англия). Существуют две модели прибора Protonique: тип СМ-1А с ручным управлением для испытанийборок размером 300х250 мм и СМ-2С с электронным управлением для проверки плат размером 450х330 мм. Для обеих моделей толщинаборок не должна превышать 30 мм. Приборы позволяют определять уровень загрязнений по отношению как к площади схемы, так и по отношению к площади схемы и компонентов в течение 3 мин. Электропитание прибора напряжением 115/220 В, потребляемая мощность 160–180 Вт. Габаритные размеры приборов СМ-1А—500х280х370 мм, СМ-2С—500х240х550 мм, масса приборов соответственно 22 и 30 кг.

Принцип действия прибора основан на измерении величины ионного загрязнения, которая выражается через эквивалентное количество хлорида натрия. Для создания эталонной жидкости раствор аналитически чистого пропанола-2 подвергается очистке прокачкой через колонку со специальными смолами до получения минимального

значения электрической проводимости. Испытываемые сборки помещают в специальный бак и под действием сильно нагнетаемой жидкости удаляют остатки загрязнений и замеряют величину ионного загрязнения. Кроме того, прибор позволяет при погружении в ванну с жидкостью измерить площадь поверхности компонентов и площадь ПП по объему вытесняемой жидкости.

При проверке качества отмывки сборок с ручным вводом данных применяется микроЭВМ HP-85A фирмы Hewlett Packard, а в случае электронного управления необходимо еще иметь интерфейсы ввода-вывода Н-Р, аналого-цифровые преобразователи, мультиплексор, самоочищающуюся ячейку проводимости «Протоник» с температурной компенсацией, блок питания для автоматического сбора данных и специальный выходной контур, управляющий всеми переключательными функциями.

Согласно международным стандартам (IPC-TM-650) допустимые уровни загрязнений в зависимости от класса аппаратуры приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Контроль качества отмывки загрязнений

Класс аппаратуры	Допустимый уровень ионных загрязнений, мкг/см ²	Допустимое содержание остатков канифоли, мкг/см ²
Бытовая электроника	до 1,56	до 200
Промышленная электроника	до 1,3	до 100
Специальная электроника	менее 1,0	до 40

Для качественной отмывки активированных флюсов типа RM92 применяют систему отмывки UNICLEAN фирмы PBT, состоящую из четырех ванн (отмывки, две ванны ополаскивания и ванна сушки). Ванна отмывки оснащена ультразвуковыми излучателями с рабочей частотой 25 кГц и системой барботажа. Оптимальное время отмывки составляет 10 мин, активирующее воздействие ультразвука – 5 мин, барботажа – 5 мин при температуре 58°C. Предварительное ополаскивание проводится в проточной водопроводной воде без подогрева в течение 2 мин, а финишное – в деионизованной воде (проводимость 0,1 мкСм) при 25°C в течение 6 мин. Сушка осуществляется обдувом горячим воздухом 70–80°C в течение 10 мин.

Глава 5. МЕТОДЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НАГРЕВА

5.1. Классификация методов нагрева и их сравнительная эффективность для пайки соединений

Современные способы пайки классифицируют по источникам тепловой энергии, являющимися главным фактором при формировании соединений. Образование паяного соединения включает стадии активации паяемых материалов, перехода припоя в жидкое состояние, смачивания и растекания припоя, взаимодействия припоя с паяемыми материалами. Таким образом, на всех стадиях тепловая энергия системы определяет скорость протекания процессов и качество соединений [60].

Передача тепловой энергии осуществляется теплопроводностью, конвекцией, излучением либо их совместным действием. При нагреве теплопроводностью источниками тепловой энергии могут быть расплав в ванне, волна припоя, нагретая жидкость либо инструмент. Конвективный теплообмен осуществляется с использованием летучего теплоносителя: горячего газа, паров жидкости, пламени горелки. Излучение в форме концентрированных потоков энергии вводится в зону пайки контактным способом, например, УЗ колебаниями, либо бесконтактным: электромагнитной волной, инфракрасным излучением, лазерным лучом и т. д. Классификация процессов нагрева при пайке приведена на рис. 5.1. Основными критериями, характеризующими эффективность способов, могут служить [6]:

– скорость нагрева: $V_T = \Delta T / \Delta t$ (5.1)

– локальность нагрева: $K_S = S_n / S_H$ (5.2)

где S_n , S_H - площади нагретой зоны и паяного соединения соответственно;

– уровень энергопотребления: $K_w = W_n / W_u$ (5.3)

где W_n , W_u - мощности, вводимая в зону нагрева и потребляемая от источника;

– уровень автоматизации: $K_A = \Sigma t_a / t_{\Pi}$ (5.4)

где t_a , t_{Π} - длительности автоматизированных операций и технологического процесса в целом;

– уровень дефектности изделия: $K_{\delta} = N_{\delta} / N_{\text{общ}}$ (5.5)

где N_{δ} – число дефектных изделий, $N_{\text{общ}}$ – общее число сформированных соединений в изделии.

Скорость нагрева определяет время, производительность и экономичность процесса пайки. Совместное действие нагрева

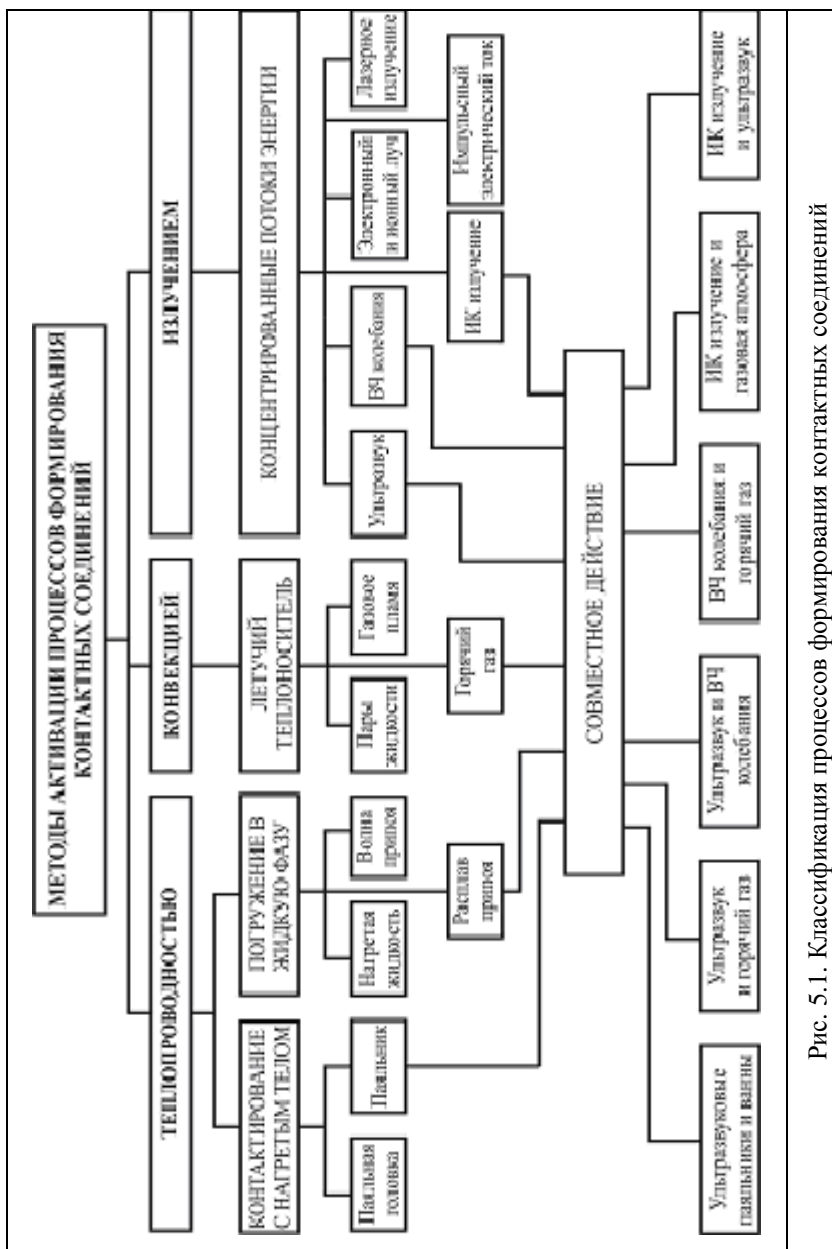


Рис. 5.1. Классификация процессов формирования контактных соединений

погружением и УЗ активации позволяет реализовать бесфлюсовую пайку, а УЗ и ВЧ, ИК излучение – бесконтактные методы активации.

Увеличение локальности нагрева позволяет ограничить температурное воздействие на паяемое изделие, снизить тем самым нагрев термочувствительных компонентов и платы, повысить качество паяных соединений. Уровень энергопотребления характеризует экономичность метода, способность эффективно использовать тепловую энергию без больших её потерь в окружающем пространстве. Уровень автоматизации показывает, какая доля операций всего технологического процесса автоматизирована и характеризует применяемое технологическое оборудование по уровню автоматизации процесса. Уровень дефектности изделия показывает экономическую эффективность данного технологического процесса и использования оборудования в серийном производстве. Кроме перечисленных факторов выбор способа групповой пайки определяется экологической чистотой процесса, особыми требованиями техники безопасности, конструктивными формами паяных соединений.

Современные процессы групповой пайки в электронике и приборостроении активируют концентрированными потоками энергии: ультразвуковой, высокочастотной, инфракрасной, лазерной и др., обеспечивающими локальное и в основном бесконтактное воздействие источника нагрева на паяемые детали [61], ускорение процессов физико-химического взаимодействия, что создает новые возможности соединения разнородных по химическому составу и свойствам материалов (табл. 5.1).

Активация пайки энергией УЗ колебаний интенсивностью (0,1–0,2) МВт/м² позволяет соединять такие труднопаяемые материалы, как керамику, стекло, ферриты, полупроводники и экономить при этом драгоценные металлы: серебро, золото, палладий, платину. УЗ лужение выводов электронных компонентов, ИМС, коммутационных элементов восстанавливает их паяемость, утраченную после длительного хранения, позволяет автоматизировать технологический процесс и отказаться от применения активированных флюсов и их очистки. Однако для УЗ активации требуются специальные припои, защитные среды, тщательный контроль параметров.

Воздействие энергии электромагнитных колебаний частотой 200–2000 кГц интенсивностью до 10⁷ Вт/м² на процессы формирования паяных соединений увеличивает до 10 раз скорость нагрева вихревыми токами, локализует до 5–10 мм² область пайки, увеличивает растекание припоя за счет пондеромоторных сил.

Таблица 5.1

Сравнительная характеристика способов нагрева при пайке

Способы пайки	Скорость нагрева в относительных числах	Удельная мощность 10^4 Вт/м ²	Время нагрева			Локальность нагрева			Припой		Тип производства	
			длинное	среднее	короткое	всей детали	зоны пайки	мягкий	твердый	малые серии	серийный	массовый
В печи	1	0,5	×			×		×	×	×	×	×
Паяльник	25	10		×		×		×	×	×	×	×
В соляной ванне	50	20	×	×		×			×	×	×	
ИК излучением	100	40		×						×	×	
Газоплазменная	200	80		×					×	×	×	×
Волной припоя	400	100		×							×	×
Электросопротивлением	800	200			×		×	×	×		×	×
Индукционная	1000	10^3			×		×	×	×	×	×	×
Лазерная	10000	10^5			×		×	×	×		×	×

Оснащение оборудования транспортными устройствами, микропроцессорными системами управления обеспечивает

автоматизацию процесса и переход к безлюдной технологии. Недостатками являются проблема защиты персонала от мощного электромагнитного излучения, зависимость скорости нагрева от электрофизических свойств металлических деталей.

Коротковолновое инфракрасное (ИК) излучение с длинами волн 1,0–2,5 мкм и интенсивностью до 10^8 Вт/м² позволяет быстро нагревать разнородные по химическому составу материалы, повысить локальность нагрева за счет фокусировки излучения, что обеспечивает групповую пайку элементов, ИМС с планарными выводами при дозированном нанесении припоя или пасты на места будущих соединений.

Лазерное излучение в оптическом диапазоне волн 0,7–10,6 мкм обеспечивает наибольшую концентрацию энергии (до 10^{12} Вт/м²), высокую локальность и практическую безинерционность лазерного луча, что способствует его высокой управляемости с помощью микропроцессорных средств. Анализ сравнительной эффективности источников электромагнитных излучений показывает (табл. 5.2) [62], что высокочастотное обладает низким энергетическим показателем и невысокой локальностью для пайки микрокомпонентов. Применение лазерного луча для групповой пайки требует решения технической задачи его разложения на несколько составляющих.

Таблица 5.2

Сравнительная эффективность активирующих воздействий

Вид излучения	Частота, кГц, λ, мкм	Интенсивность, МВт/м ²	Kw	Ks, Одиночная/ групповая
Ультразвуковое	18–70	0,1–0,2	0,3–0,5	10-20 / 2,5-1
Высокочастотное	200–2000	0,5–10	0,–0,2	8-50 / 1,5-1
Инфракрасное	10^8 – 10^{10}	10–100	0,3–0,5	2-100 / 1-0,5
Лазерное	0,4–12,5	10^3 – 10^6	0,6–0,8	0,1-2,0 / 0,5-0,05

Перспективы научных исследований в области активированных процессов групповой пайки связаны с использованием комбинированных методов активации, например, УЗ и газовой, ВЧ и УЗ, ИК и УЗ и т.д., что обеспечивает прецизионность и регулируемость потоков энергии, позволяет создать программно-управляемое микропроцессорное оборудование и обеспечить высокое качество контактных соединений в условиях дефицита материалов и энергии.

5.2. Оборудование и инструмент для нагрева теплопроводностью

Нагрев теплопроводностью жала паяльника широко применяется при монтаже изделий в условиях мелкосерийного производства, а также во всех случаях ремонтных работ. Технологический процесс пайки паяльником состоит из следующих операций: фиксации соединяемых элементов, нанесения дозированного количества флюса и припоя, нагрева места пайки до заданной температуры и выдержка в течение фиксированного времени, охлаждения соединения без перемещения паяемых деталей, очистки соединения, контроля качества. Для обеспечения надежности паяных соединений предусматривают:

- механическое закрепление элементов и монтажных проводников на контактных лепестках и гнездах при объемном монтаже,
- выбор оптимальных зазоров в конструкции соединений между поверхностями монтажных элементов.

При пайке оловянно-свинцовыми припоями зазоры d определяют по формуле [63]:

$$d = D_{ome} - D_{в} \geq 0,2 - 0,3, \quad (5.6)$$

где D_{ome} - диаметр металлизированного отверстия, $D_{в}$ - диаметр вывода элемента.

Температура пайки выбирается из условия наилучшей смачиваемости припоем и отсутствия значительного теплового воздействия на паяемые элементы. Выбор температуры пайки осуществляют практически на 20-50°C выше температуры плавления припоя (рис.5.2). Как видно из графической зависимости площади смачивания от температуры нагрева припоя на участке А смачивание

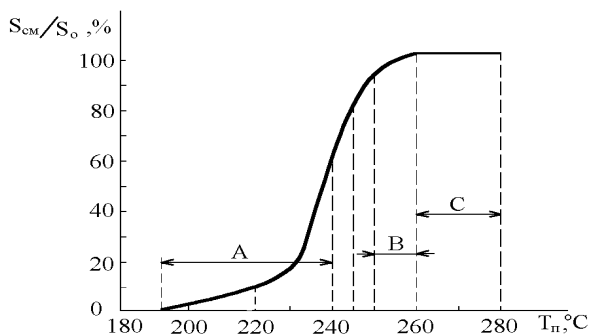


Рис.5.2. Зависимость площади смачивания от температуры

недостаточно, С - максимальное, В - оптимальное (не вызывает перегрева припой и паяемых материалов).

Требуемый температурный режим при индивидуальной пайке обеспечивается теплофизическими характеристиками применяемого паяльника:

- температурой рабочего конца жала,
- степенью стабильности этой температуры, обусловленной динамикой теплового баланса между теплопоглощением паяемых деталей, теплопроводностью нагревателя и теплосодержанием паяльного жала,
- мощностью нагревателя и термическим КПД паяльника, определяющими интенсивность теплового потока в паяемые детали.

В технологии изделий электроники поддержание на заданном уровне температуры жала паяльника является весьма важной задачей, поскольку при формировании электромонтажных соединений на печатных платах с использованием микросхем, полупроводниковых приборов и функциональных элементов, термочувствительных и критичных к нагреву, возможен выход из строя дорогих и дефицитных элементов, снижение надежности изделия. Особенно критична к температурному режиму ручная пайка паяльником. Режим пайки паяльником задается следующими параметрами: температура жала паяльника 280-320°C, время пайки не более 3-х секунд. Однако из-за интенсивной теплоотдачи сначала в припой, набираемый на жало, а затем в паяемые элементы температура рабочей части жала паяльника снижается на 30-110°C и может выйти из оптимального температурного интервала пайки (рис.5.3).

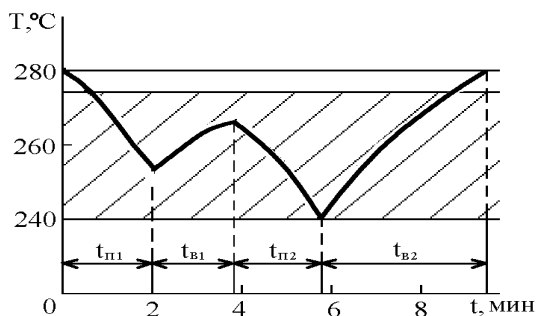


Рис.5.3. Термический цикл пайки паяльником для припоя ПОС 61

Соотношение между временем пайки и продолжительностью пауз должно обеспечить восстановление рабочей температуры паяльного жала. Длительность восстановления зависит от теплопроводности жала, его длины, эффективной мощности нагревателя и степени охлаждения при пайке. Рекомендуемые мощности паяльников: для микросэлектронных изделий 4, 6, 12, 18 Вт; для печатного монтажа 25, 30, 35, 40, 50, 60 Вт; для объемного монтажа 50, 60, 75, 90, 100, 120 Вт. КПД паяльников имеет в настоящее время тенденцию к повышению от 35 до 55% за счет внутреннего обогрева жала вместо внешнего. Напряжение питания нагревателя - 24, 36, 42 В, а в бытовых паяльниках оно может составлять 220 В.

В паяльнике перенос тепла осуществляется за счет теплопроводности жала, которое служит аккумулятором тепла, выделяемого нагревателем, расположенном на стержне. Взаимосвязь температуры жала длиной L в рабочей зоне $T_{ж}$ и зоне нагрева T_n выражена отношением [62]:

$$T_{ж} = \frac{T_n}{ch(\beta \cdot L)}. \quad (5.7)$$

Обобщенный параметр β равен:

$$\beta = \sqrt{\alpha \cdot \Pi / \lambda \cdot S} = \sqrt{4\alpha / \lambda \cdot D}, \quad (5.8)$$

где α – коэффициент теплоотдачи поверхности, Π – периметр жала, λ – коэффициент теплопроводности, S – площадь поперечного сечения, D – диаметр.

Расчеты по формуле (5.8) для медного стержня паяльника диаметром 6 мм дают значение $\beta=3,12$, тогда $T_{ж} = T_n / 1,2$. В установившемся режиме количество теплоты, накопленное в медном стержне, зависит от мощности нагревателя и изменение температуры может быть определено:

$$\Delta T = I^2 R t / c \cdot m, \quad (5.9)$$

где c – удельная теплоемкость меди, m – масса стержня.

Расчетные зависимости по формуле (5.9) (рис.5.4) согласуются с экспериментальными данными в режиме теплового баланса. Для более точных расчетов необходимо учитывать потери тепла на теплоотдачу к защитному кожуху и на излучение от поверхности стержня.

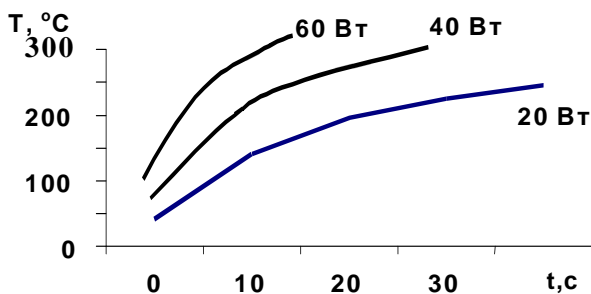


Рис. 5.4. Температурные зависимости паяльника

Анализ температурных зависимостей в зоне пайки SMD при различных вариантах нагрева (рис. 5.5.) показывает, что к числу "медленных" источников концентрированных потоков энергии относятся паяльник (1) и диффузный ИК нагрев (2), у которых скорость нагрева в зоне пайки находится в пределах 10-15°C/с, что не достаточно для автоматизированных процессов.

Способ пайки параллельными электродами основан на прямом нагреве места соединения током, подводимым через электроды (рис.5.6). Достаточное для расплавления припоя тепло выделяется в паяемых деталях (выводе ИМС и контактной площадке печатной платы) на участке межэлектродного зазора, в который вводится припой.

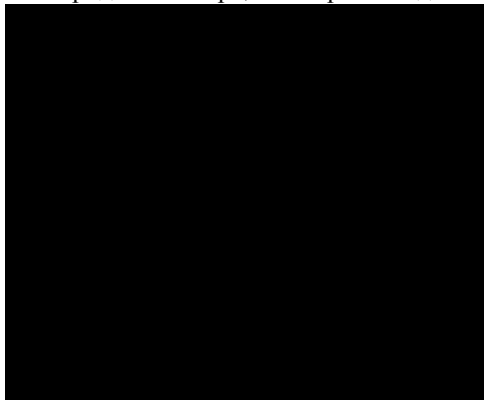


Рис. 5.5. Температурные зависимости в зоне пайки при различных вариантах нагрева: 1–паяльником, 2–ИК, 3–ВЧ, 4–ВЧ и ИК, 5–лазером

Электроды перемещаются в вертикальной плоскости независимо друг от друга и прижимаются к выводу ИМС усилием F . От регулируемого источника питания через понижающий трансформатор подается импульс тока I_n , который перетекает от одного электрода к другому через паяемые детали.

Ввиду большого разброса параметров соединяемых материалов (толщины выводов ИМС и покрытий контактных площадок) в процессе пайки сильно меняется сопротивление нагрузки, а с увеличением нагрева деталей растет электросопротивление в зоне контакта.

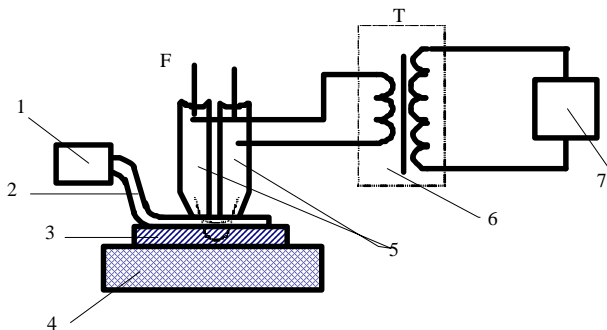
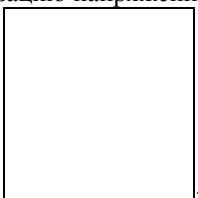


Рис. 5.6. Схема пайки параллельными электродами:
 1 - ИМС, 2 - вывод, 3 - контактная площадка, 4 - плата, 5 - электрод,
 6 - источник питания

Поэтому для нагрева при пайке параллельными электродами используют регулируемый источник с целями обратной связи, обеспечивающий стабилизацию напряжения на электродах [59]:



В 80-тых годах способ пайки параллельными электродами возродился на новой технической основе. Разработаны источники тока повышенной частоты (до 1 кГц), которые обеспечивают подачу импульсного тока пачками импульсов, стабилизированных по напряжению, длительностью 5–50 мс. Это позволяет стабилизировать температуру в зоне соединения, а также за счет возникновения вибраций и течений в расплавленном припое под действием

электродинамических сил дополнительно активировать процесс смачивания выводов ИМС припоем. Важным преимуществом данного способа является возможность вести активный контроль качества соединений по величине паяльного тока, что делает этот способ более экономичным и производительным по сравнению со способами, использующими визуальный контроль.

Способ пайки параллельными электродами реализован в автомате с программным управлением «ПОИСК» для ИМС в корпусе 401.14–1. Автомат состоит из координатного стола, 2-х паяльных головок с автоматической раздвижкой, манипулятора, системы управления на основе микроЭВМ «Электроника С5–21М». Производительность автомата - до 200 шт/ч, скорость перемещения координатного стола по осях X и Y на 300 мм - 0,625 м/мин, шаг - 0,625; 1,25 мм. Давление электродов на выводы 0,5–18 Н, напряжение на электродах 0,3–1,0 В; время пайки - 0,10–0,8 с.

5.3. Конвективные источники нагрева

При нагреве конвекцией в качестве теплоносителя используют воздух, водород, азот, аргон или смесь газов. В большинстве случаев стремятся исключить из состава теплоносителя кислород, окисляющий припой в процессе пайки. Применение водорода в допустимых пределах во многих случаях предпочтительней, поскольку он обладает весьма высокими значениями теплопроводности и теплоемкости.

Для нагрева газа чаще всего используются электронагревательные элементы, устанавливаемые вокруг трубопроводов или в специальных камерах, по которым пропускают теплоноситель. Хорошо зарекомендовал себя способ нагрева газа пропусканием электрического тока от низковольтного источника по полой трубе, выполненной из материала с большим омическим сопротивлением [63] (рис. 5.7).

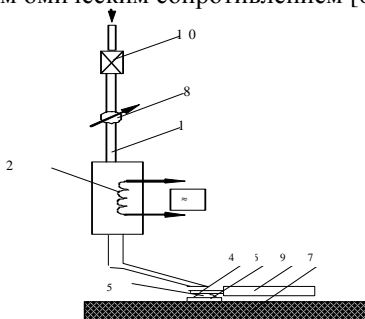


Рис. 5.7. Схема пайки горячим газом: 1 - магистраль, 2 - нагреватель, 3 - сопло, 4 - вывод, 5 - припой, 6 - контактная площадка, 7 - плата, 8 - манометр, 9 - элемент, 10 – редуктор

От магистрали повышенного давления 1 газ или горячий воздух проходит через устройства нагрева 2 и затем поступает к соплам 3 рабочих головок. В этой зоне находится печатная плата 7 с предварительно смонтированными элементами и нанесенным в места соединений необходимым количеством припоя и флюса. Технологический режим пайки обеспечивается за счет изменения величины расхода и температуры направленного потока газа и регулирования скорости относительного перемещения платы и головок. Для предотвращения перегрева навесного элемента или контактного вывода его обдувают узким направленным потоком холодного воздуха.

С целью сокращения нагрева мест пайки струя теплоносителя направляется обычно под некоторым углом к поверхности платы, чтобы зона ее действия была шире и осуществлялся предварительный подогрев соседних компонентов. Для этого также предварительно подогревают припой, еще до выполнения паяного соединения. Если в качестве теплоносителя используется горячий воздух, припой должен быть покрыт слоем флюса для защиты его от окисления при разогреве.

Дальнейшим развитием метода является применение двух струй газа, направленных навстречу друг другу, когда в результирующую горячую область помещается паяемый компонент. Для подачи газа используют компрессор, а разогрев его происходит в электронагревателе мощностью 0,8–1,0 кВт. Поскольку воздух является плохим носителем тепла, то чаще используют аргон, азот или их смеси.

Оборудование для газовой пайки обеспечивает 80–100 соединений в минуту на одно сопло. Установка с 12 соплами, предназначенная для пайки схемы, состоящей из 100 печатных плат, выполняет 1,5 тысячи соединений в минуту. На оборудовании для пайки штырей с контактными площадками печатных плат достигнута производительность 7,5 тысяч соединений в минуту.

Фирмой FUNK & MEIER AG разработана настольная установка SURFACE MOUNT 201 для пайки чиповых элементов горячим газом. Установка снабжена стереомикроскопом для работы оператора по сборке плат размером 250x450 мм и высотой элементов до 25 мм (рис. 5.8). Воздух под давлением 4 - 8 бар и регулируемой температурой в

пределах 150–450°С подается в зону пайки. Установка снабжена блоком микропроцессорного управления или персональной ЭВМ [64].

Промышленностью Республики Беларусь выпускалась установка СТ-508 [65], которая обеспечивала монтаж поверхностно-монтируемых элементов типа конденсаторов К10-17 "в", транзисторов КТ31, диодов КТ62, резисторов Р1-12, а также размещение чиповых элементов в двух круговых накопителях по 18 лотков; зажим плат размером от 60х80 до 250х450 мм, дозированное нанесение припойной пасты, флюса, клея;

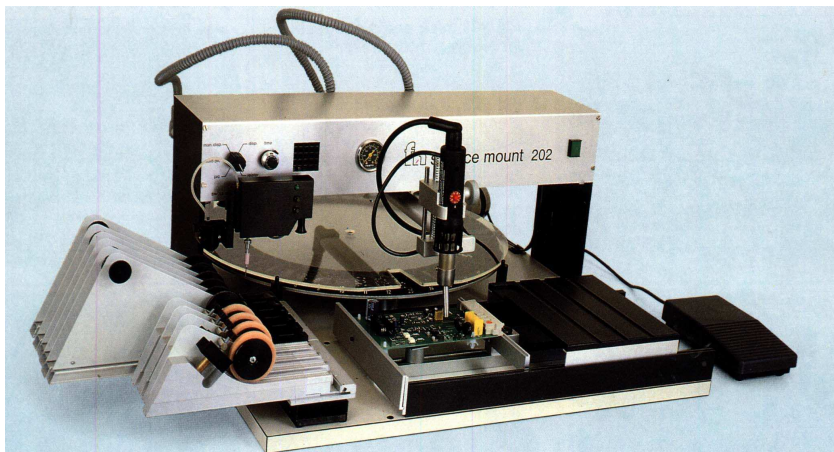


Рис. 5.8. Установка пайки SMD горячим газом

вакуумный захват, ориентацию по углу, позиционирование по осям "X", "Y", "Z" элементов; предварительный подогрев плат до температуры 80-230°С; автоматическое поддержание температуры газового потока паяльников в интервале 120–400°С и рабочей поверхности платы.

Два газовых паяльника обеспечивали технологическую производительность при времени пайки не более 1,5 с до 400 плат/час. Потребляемая мощность 0,8 кВт. Недостатком является отсутствие автоматизации установки и пайки элементов, что ограничивала область ее применения мелкосерийным производством.

5.4. Методы нагрева концентрированными потоками излучения

Для нагрева зоны формирования паяных соединений в настоящее время широко применяются концентрированные потоки излучения электромагнитных полей в широком частотном диапазоне. Воздействие

энергии электромагнитного поля высокой частоты (ВЧ) на паяемые детали и припой проявляется в виде высокопроизводительного бесконтактного нагрева до температуры пайки с помощью наведенных в металле вихревых токов. При этом скорость нагрева может быть увеличена до 10 раз по сравнению с конвективными источниками, зона нагрева локализуется в пределах участка, определяемого конструкцией индуктора. Высокая скорость нагрева токами ВЧ достигается соответствующим выбором частоты тока. Поскольку плотность токов ВЧ по сечению детали распределяется неравномерно, а увеличивается к поверхности вследствие поверхностного эффекта, то глубина их проникновения в металл детали определяется как [66]

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}}, \quad (5.11)$$

где ρ - удельное электрическое сопротивление металла, μ - магнитная проницаемость металла, f - частота.

Впервые использовать ВЧ нагрев в целях сварки и пайки предложил профессор Вологдин В.В. в России в 30-х годах XX века. Нагрев электромагнитными колебаниями средней частоты 10–66 кГц с интенсивностью 1–100 МВт/м², при котором отношение глубины проникновения к толщине детали h находится в пределах $\delta/h < 0,5 - 1,0$, используется для конструкционной пайки волноводных трактов, металлобумажных конденсаторов, коммутационных элементов, твердосплавного инструмента и т.д.[67–68].

Для каждого конкретного случая пайки время нагрева можно определить по специальным диаграммам [61], если известна мощность индуктирующего устройства, приходящаяся на данную массу. При расчете массы принимают во внимание лишь тот объем детали, который фактически должен нагреваться до температуры пайки. Время находится в пределах нескольких секунд и лишь в исключительных случаях превышает минуту.

Индукционная пайка электромагнитным полем среднечастотного диапазона имеет преимущественное применение при малых размерах деталей во всех видах производства. Для этого применяются генераторы с выходной мощностью до 25 кВт, которые состоят из генератора, рабочего стола или электрически связанной машины пайки, установленных стационарно. Схема ВЧ лампового генератора,

работающего в режиме самовозбуждения с двойным преобразованием тока, приведена на рис. 5.9.

При нагреве под пайку простых по конфигурации соединений, таких, как цилиндрические или прямоугольные стержни, нагреваемые в кольцевых индукторах, необходимую колебательную мощность генератора (кВт) определяют по формуле [67]:

$$P_{\Gamma} = \frac{cG(T_{\Pi} - T_{Н})}{0,24\tau\eta}, \quad (5.12)$$

где c – удельная теплоемкость паяемого металла в интервале от исходной температуры до температуры пайки, G – масса нагреваемого материала, кг; T_{Π} – температура пайки, °С; $T_{Н}$ – начальная температура, °С; τ – время нагрева, с; η – КПД индуктора, принимаемый 0,7–0,8 при нагреве стали и 0,3–0,4 при нагреве меди.

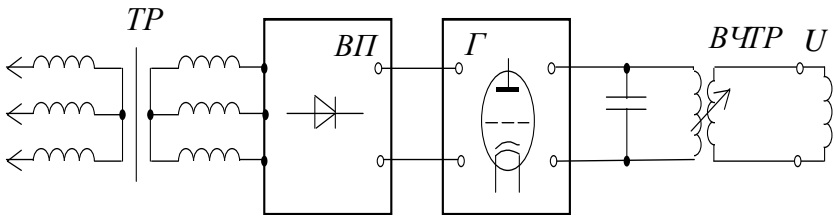


Рис. 5.9. Схема ВЧ лампового генератора

Активная удельная мощность ВЧ нагрева, выделяемая в изделии равна [69]:

$$P_2 = 2,0 \cdot 10^{-4} I_1 W_1^2 \sqrt{\rho_2 \mu_2} f F, \quad (5.13)$$

где I_1 – ток индуктора, W_1 – число витков индуктора, ρ_2 и μ_2 – удельное электросопротивление и магнитная проницаемость изделия, F – функция, зависящая от геометрии и размеров детали и частоты тока.

Активная мощность, потребляемая индукционной установкой от сети P_c можно выразить через полезную мощность $P_{пол}$:

$$P_c = P_{пол} / \eta_u \eta_{кб} \eta_l \eta_{пу}, \quad (5.14)$$

где η_u , $\eta_{кб}$, η_l , $\eta_{пу}$ – КПД индуктора, конденсаторной батареи, линии, питающего устройства соответственно.

Полезная мощность составит:

$$P_{пол} = C_{cp}(t_k - t_0)dn / 0,24 \tau_n, \quad (5.15)$$

где C_{cp} – средняя интегральная удельная теплоемкость, t_k , t_0 – конечная и начальная температура, d – масса, n – число заготовок, τ_n – время нагрева, с.

Полный КПД индуктора

$$\eta_u = \eta_{\text{э}} \eta_T \quad (5.16)$$

где $\eta_{\text{э}}$ – электрический, η_m – термический КПД индуктора.

$$\eta_T = \frac{P_{пол}}{P_{пол} + \Delta P_{\Gamma}}, \quad (5.17)$$

где ΔP_m – тепловые потери в индукторе.

$$\eta_{\text{э}} = \frac{P_{пол} + \Delta P_T}{P_U} = \frac{P_{пол} + \Delta P_T}{P_{пол} + \Delta P_T + \Delta P_{\text{э}}}, \quad (5.18)$$

где $\Delta P_{\text{э}}$ – электрические потери в индукторе.

Для круглых заготовок диаметром d_2 и диаметр индуктора d_1 .

$$\eta_{\text{э}}^{np} = \frac{1}{1 + \frac{d_1}{d_2} \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2 \mu_2}}} \quad (5.19)$$

Практически предельное значение электрического КПД достигается при значениях $d_2/\Delta_2 > 10$ для стали $\eta_{\text{э}}$ 0,7-0,8, для меди – 0,5.

При пайке микроэлектронных устройств, содержащих металлический корпус и размещенную внутри него подложку или плату с элементами, чувствительными к электрической составляющей поля, энергия электромагнитной наводки должна быть много меньше энергии деградации элементов ИМС, которая составляет 10–15 мкДж [70]. На глубине, равной 4δ , напряженность поля будет ослаблена в 100 раз по сравнению с поверхностью и на порядок ниже напряженности наводок, приводящих к деградации внутренних элементов. Таким образом, выбор частоты при пайке микроэлектронных устройств необходимо осуществлять из условия [71]:

$$\delta \leq h/4, \quad (5.20)$$

где δ – глубина проникновения ТВЧ в металл, h – толщина корпуса.

Нижняя частота тока с учетом соотношения определяется так:

$$f_{\min} \geq 4,05 \cdot 10^{-6} \frac{\rho}{(\mu h^2)} \quad (5.21)$$

Верхний предел частоты тока вытекает из требования максимальной величины термического КПД нагрева, при котором

$$\delta > h/8, \quad (5.22)$$

а также с учетом малых толщин стенок корпуса БИС, составляющих десятые доли миллиметра

$$f_{\max} < 16,2 \cdot 10^{-6} \frac{\rho}{(\mu h^2)} \quad (5.23)$$

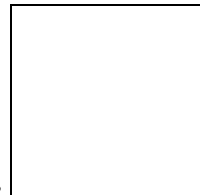
Этим условиям удовлетворяет нагрев энергией высокочастотных электромагнитных колебаний в диапазоне 440–2000 кГц. С повышением частоты нагрева происходит локализация тепловыделения, снижается температурное воздействие на паяемое изделие. Дальнейшее повышение локальности и избирательности нагрева токами ВЧ достигают с помощью магнитопроводов из феррита, устанавливаемых вблизи нагреваемых мест [72]. Воздействие мощного электромагнитного поля на расплавленный припой вызывает его интенсивное перемешивание за счет вихревых токов и пондеромоторных сил, что улучшает растекание припоя.

Воздействие энергии электромагнитных колебаний позволяет осуществить не только высокопроизводительный бесконтактный нагрев деталей и припоя с помощью наведенных в них вихревых токов ВЧ, но и активировать припой и улучшить его растекание по паяемым поверхностям. Качество паяемых соединений в процессах высокочастотной пайки зависит от следующих факторов: скорости нагрева деталей и припоя, избирательности и локальности ВЧ нагрева, равномерности и регулируемости нагрева во времени и по сечению паяемых деталей [73,74].

Скорость нагрева токами ВЧ пропорционально мощности, выделяемой в детали [56]:

$$P = \frac{V_{эф}^2 \cdot \eta \cdot \cos \varphi}{R_{дем}}, \quad (5.24)$$

где $V_{эф}$ - эффективное напряжение на индукторе,



коэффициент мощности нагрева, $R_{дет}$ - электрическое сопротивление детали.

Электрическое сопротивление детали определяется как:

$$\square, \quad (5.25)$$

где $l_{дет}$ - периметр зоны нагрева детали, H - ширина зоны нагрева.

Таким образом, ВЧ нагрев характеризуется наибольшей эффективностью для металлов, имеющих большие удельное сопротивление и магнитную проницаемость (например, никелевые сплавы), которая уменьшается обратно пропорционально корню квадратному из частоты колебаний. Снижение частоты колебаний увеличивает электродинамический эффект перемешивания расплавленного припоя.

Технологический процесс герметизации корпусов БИС и микросборок включает подготовку корпусов и крышек к пайке, сборку корпуса в приспособлении, высокочастотную пайку, контроль качества паяного шва и герметичности корпуса. Подготовка корпусов крышек к пайке заключается в обезжиривании и горячем лужении паяемых поверхностей припоем ПОСБ1. После лужения остатки флюса удаляют промывкой в спиртобензиновой смеси. При сборке корпуса 1 в приспособлении 2 крышку 3 прижимают к корпусу с усилием 1–3 Н с помощью защитного экрана 4, а индуктор помещают на расстоянии 2–3 мм от крышки. С выхода ВЧ генератора напряжение с помощью токоподводов 6 подается на индуктор (рис. 5.10). Высокочастотную пайку корпусов БИС и микросборок вели при анодном токе генераторной лампы, 1,0–1,3 А, сеточном токе 0, 3–0, 6 А, на частоте колебаний 440 ± 10 кГц в течение 3–5 с [75].

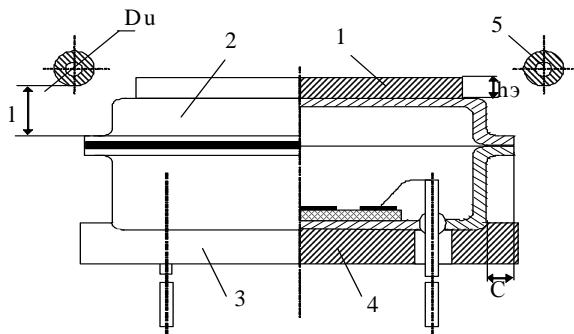


Рис 5.10. Схема ВЧ пайки корпусов БИС

Для исключения попадания флюса во внутренний объем приборов используют 2-х этапный процесс и аэрозольное флюсование с помощью спреера [76].

Для герметизации полупроводниковых приборов ВЧ пайкой предложен индуктор на незамкнутом магнитопроводе (рис. 5.11), который концентрирует излучение в области зазора [77]. Магнитопровод индуктора состоит из 2-х сердечников 1 и 2 ферромагнитного материала, в зазоре которых производится нагрев деталей. Рабочая обмотка 3 охватывает оба сердечника и подключена к ВЧ генератору 4. Обмотка подмагничивания постоянным током состоит из 2-х секций 5 и 6 и подключена с помощью переключателя 7 к выходу усилителя 8 постоянного тока или ко входу регулирующего выпрямителя 9. Вход усилителя 8 подключен к выходу сравнивающего устройства 10, один из входов которого подключен к выходу выпрямителя 11, подключенного к обмотке 12 обратной связи, а второй - к источнику 13 опорного напряжения.

В основу регулирования положена зависимость магнитной проницаемости магнитопровода на переменном токе от величины подмагничивания постоянного тока. Увеличивая ток подмагничивания, изменяют магнитную проницаемость магнитопровода, а следовательно напряженность ВЧ поля в зазоре магнитопровода.

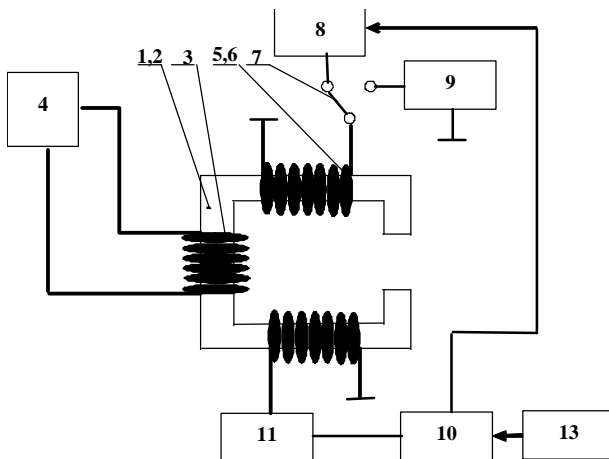


Рис. 5.11. Схема индуктора на незамкнутом магнитопроводе

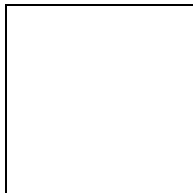
При сборке приборов миллиметрового диапазона длин волн большую трудность представляет формирование окон вывода энергии, представляющих собой основание в виде диска из молибдена или сплава 29НК диаметром 10–20 мм и толщиной 1–10 мм с прямоугольным каналом стандартного сечения, по фаскам которого припаяна стеклянная пленка толщиной 20–70 мкм [78]. Для пайки пленок разработан полуавтомат, в основу которого положен ВЧ нагрев основания. При нагревании пленка оплавляется и припаяется к основанию по его торцевой поверхности и фаскам канала. После пайки стекло с торцевой поверхности сошлифовывают. Нагрев осуществляется тремя неподвижными ВЧ индукторами, к которым подводят паяемые детали окон. При этом нагрев производится в герметизированных защитных оболочках из кварцевого стекла, установленных в индукторах. Ток ВЧ от генератора на индукторы подают поочередно, его коммутирование осуществляют переключателем, а время нагрева – с помощью реле времени. Основные технологические режимы ВЧ пайки окон: время нагрева – 1–10 с, время нагрева и продувки азотом 3–30 с, время подачи водорода 1–10 минут.

Вибрационный эффект ВЧ нагрева на частотах более 440 кГц в жидком припое крайне незначителен и не оказывает влияние на растекание припоя [79]. В этом случае более эффективно применение УЗ колебаний в комбинации с ВЧ нагревом [80]. При ВЧ пайке

телескопических соединений в одном из элементов возбуждают УЗ крутильные колебания с помощью двух акустических волноводов [81].

Применение ВЧ нагрева для пайки в производстве изделий электроники имеет хорошие перспективы ввиду возможности гибкой автоматизации процесса путем использования программно-управляемого ВЧ оборудования, транспортных устройств и управляющих микроЭВМ. Недостатком является необходимость защиты персонала от электромагнитного излучения путем экранировки генератора индуктора.

Под лучистой энергией понимают энергию оптической области спектра электромагнитных излучений с длиной волны 0,01 – 840 мкм, которая делится на инфракрасную (340 - 0,77), видимую (0,777–0,38), ультрафиолетовую (0,38 – 0,01). В общем случае поток лучистой энергии, достигая поверхности тела, частично поглощается, частично отражается и частично проходит через это тело:



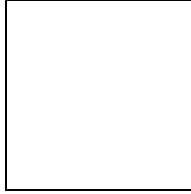
(5.26)

Специфика нагрева металла лучистой энергией определяется высокой концентрацией в них свободных электронов, которые служат источниками вторичных волн. Коэффициент отражения и поглощения зависит от длин волн, электропроводности металла и температур.

С увеличением частоты колебаний световой волны отражающая способность металлов уменьшается и большая часть излучения поглощается, таким образом, энергетически выгодно использовать более коротковолновую часть спектра. Энергетическими параметрами пучка лучистой энергии являются: максимальная плотность лучистого потока в центре фокального пятна E_{2m} , Вт/см²; энергетическая мощность излучателя (лампы) P_l (Вт); энергетическое КПД η (%); коэффициент сосредоточенности лучистого потока K (1/см²)

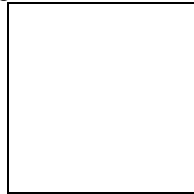
Эти параметры определяются пространственным распределением плотности лучистого потока в фокальном пятне на двунаправленных направлениях $E_2(x, y)$ или по радиусу пятна $E_2(r)$. Распределение плотности лучистого потока в фокальном пятне оптического источника теплоты приближенно описывается уравнениями:

- для нормально-кругового источника:



(5.27)

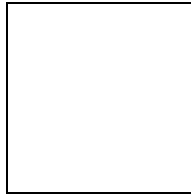
- для нормально-полосового источника ограниченной длины l :



(5.28)

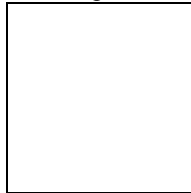
Интегральный лучистый поток в фокальном пятне может быть рассчитан по уравнениям:

- для нормально-кругового источника:



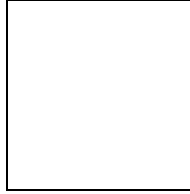
(5.29)

- для нормально-полосового источника ограниченной длины:



(5.30)

Пайка инфракрасным (ИК) излучением обеспечивает возможность бесконтактного нагрева на воздухе, в контролируемой газовой среде или в вакууме. Интенсивность спектрального излучения I зависит от температуры T , длины волны источника и спектральной степени черноты излучателя:



(5.31)

где C_1, C_2 - постоянные Планка, соответственно равные $3,74 \text{ мВт/м}^2$ и $0,1439 \text{ м} \cdot \text{К}$.

Температура нити кварцевых ламп с иодным циклом составляет обычно $2000\text{--}3500\text{К}$, а диапазон теплового лежит в пределах длин волн $0,76\text{--}1000 \text{ мкм}$. Падающее на металлическую поверхность ИК излучение незначительно проникает вглубь и в основном отражается от его поверхности. Нормальная отражательная способность гладких поверхностей чистых металлов зависит от их электропроводности ρ и температуры поверхности T [82]:

$$\xi = 1 + 0,1\rho T. \quad (5.32)$$

В инфракрасной области спектра с увеличением электропроводности металлов их отражательная способность возрастает до 98%. Среди чистых металлов полированное серебро, медь, алюминий являются лучшими отражателями и используются для изготовления рефлекторов в установках ИК нагрева, которыми осуществляют фокусировку излучения.

Количество тепла, поглощенного поверхностью под действием ИК нагрева, определяется законом Стефана-Больцмана:

$$Q = E_u E_m S F K (T_u - T_n), \quad (5.33)$$

где E_u - эмиссия источника нагрева, E_m - поглощение материала, S - площадь нагрева, F - фактор источник/продукт, K - константа Стефана-Больцмана, T_u, T_n - температуры источника и платы соответственно.

Нагрев ИК излучением в целях пайки имеет ряд технологических преимуществ, однако их реализация зависит от правильно сконструированной установки ИК нагрева. В настоящее время широкое применение в технологических процессах пайки получили два вида ИК нагрева: локальный сфокусированный и прецизионный рассеянный. В зависимости от конкретных условий используют различные по геометрии рефлекторы, формирующие тепловое поле в зоне нагрева. Для локального нагрева целесообразны отражатели эллиптической формы, фокусирующие излучение источника света, помещенного в ближнем фокусе рефлектора на объект нагрева в дальнем фокусе (рис. 5.12,а). В зависимости от типа излучателя 1 рефлекторы 2 формируют фокальное пятно в виде круга (для точечных), либо полосы (для

линейных излучателей) (рис. 5.12,б), причем плотность ИК излучения, а следовательно, и температура в фокальном пятне убывает по мере удаления от центра по закону, близкому к закону Гаусса [83].

В условиях прецизионного нагрева достигается высокая равномерность температуры в результате многократных переотражений излучения объекта. Для установок периодического или непрерывного (конвейерного) типа используются овально-цилиндрические рефлекторы, которые особенно эффективны для низкотемпературной групповой пайки. Для ограничения зоны нагрева и снижения температурного влияния на паяемые элементы применяют сопловые насадки с внутренней отражающей поверхностью (рис. 5.12,в), либо применяют защитные диафрагмы.

В качестве источника ИК излучения используют галогенные лампы мощностью 100–650 Вт для точечных и 1000–5000 Вт для полосовых излучателей. Для галогенной лампы КИ-220-1000 при питающем напряжении 220В максимальная спектральная интенсивность излучения I достигает 63 Вт/стер·мкм на длине волны, равной 1,1 мкм.

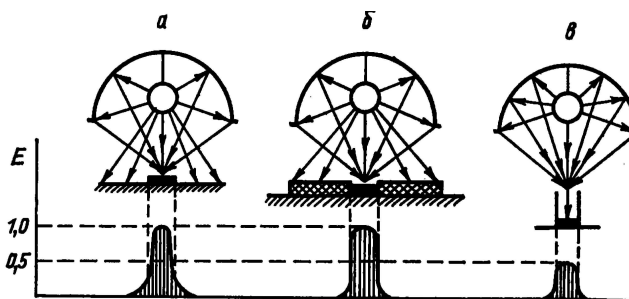


Рис. 5.12. Отражатели ИК излучения: фокусирующий (а), диффузный (б), с сопловой насадкой (в)

Применение сфокусированного ИК излучения позволяет осуществить локальный нагрев в зоне диаметром 2–3 мм или узкой полосе шириной до 5 мм со скоростью 30–50 град/с при интенсивности излучения 100–120 Вт/см².

Для ИК нагрева в технологии ИЭ в большей степени используется узкий диапазон длин волн от 1 до 5 мкм, который в свою очередь делится на коротковолновый или ближний от 1 до 2,5 мкм, и средневолновый от 2,5 до 5 мкм. Коротковолновый диапазон ИК излучения позволяет более быстро нагревать объекты, поскольку

согласно закону смещения Вина максимальная величина спектральной интенсивности излучения с повышением температуры сдвигается в сторону более коротких волн.

Для защиты поверхности отражателя и лампы от паров флюса предусмотрено использование либо съемного кварцевого стекла, либо прокачка горячего воздуха в пространстве между отражателем и диаграммой. С целью обеспечения непрерывной длительной работы рефлектор охлаждается водой с расходом 0,4 л/мин.

Способ пайки ИК излучением высокопроизводителен, инвариантен к типу паяемого изделия (корпус ИМС, печатная плата), экологически чист (не загрязняет окружающую среду), позволяет программировать режимы нагрева и вести пайку в любой контролируемой атмосфере, например нейтральной или защитной, газовой.

Разработан ряд печей конвейерного типа различной конструкции, мощности, габаритов и способа нагрева, для низкотемпературной пайки, сушки и отжига ИЭТ при температурах до 600⁰С, для пайки электронных компонентов на платы при монтаже микросборок, гибридных интегральных схем, а также для сборки и герметизации ИЭТ пайкой низкотемпературными припоями в среде инертных газов, термообработки ИМС, сушки клеев, лаков, компаундов.

Современные установки ИК пайки, снабжены микропроцессорной системой управления с функциональной клавиатурой и дисплеем, обеспечивающих регулирование и отслеживание всех параметров процесса. В них имеется от 6 и более зон ИК нагрева, зона УФ нагрева и зона охлаждения вентиляторами.

ИК нагрев, обеспечивая высокие скорости нагрева изделий, создает и значительные температурные градиенты, которые отрицательно влияют на надежность электронных сборок, выполненных на керамических подложках. Лучшим компромиссом для пайки керамических плат является сочетание нагрева нижней стороны платы теплопроводностью до 140⁰С, а верхней – ИК излучением. При этом температурные градиенты не превышают 1 – 4⁰С/с. Недостатками ИК нагрева являются: низкая локальность зоны нагрева, недостаточная интенсивность, повышенное время процесса пайки, нагрев не только паяного соединения, но и обширной прилегающей зоны, что приводит к термической деструкции диэлектрика печатной платы, а также электронных компонентов.

Во избежание термического разрушения печатной платы применяют специальные защитные маски, металлические экраны, теплоотводящие оправки. Перспективен для монтажа радиоэлементов

на печатные платы метод нагрева световым лучом дуговых ксеноновых ламп сверхвысокого давления. Эти источники света имеют спектр излучения с длинами волн 0,2–2,4 мкм. Такое излучение более эффективно для нагрева металлов, чем ИК излучение ламп накаливания и излучение лазера, так как коротковолновая часть спектра лучше поглощается металлом контактной площадки, припоем, выводами и покрытиями радиоэлементов и в меньшей мере поглощается диэлектрической основой. Оборудование для нагрева световым лучом менее энергоемко по сравнению с лазером, его энергетический КПД составляет 30 – 40 %, оно сравнительно просто по конструкции и удобно в эксплуатации [84].

Для фокусирования излучения источников света при пайке наиболее перспективны оптические системы на основе эллипсоидных отражателей. Оптическая система с излучателем ДКСШ - 500 мощностью 500 Вт позволяет расщепить пятно нагрева на два равных пятна с плотностью энергии в каждом 240 Вт/см^2 . Расстояние между центрами пятен может изменяться от 0 до 35 мм в зависимости от марки паяемого радиоэлемента. На основе разработанной оптической системы создана установка для пайки радиоэлементов на печатные платы световым лучом дуговых ксеноновых ламп. Для диаметра вывода 0,6 мм максимальная плотность лучистого потока 250 Вт/см^2 , время пайки при этом составило 0,3 с. Печатная плата последовательно перемещается от одного соединения до другого с остановкой на время пайки и подачи импульса излучения. При автоматической пайке производительность процесса в среднем составила 50–60 паяк/мин. При одновременной двусторонней пайке расщепленным лучом с максимальной плотностью лучистого потока в каждом пятне нагрева, равной 200 Вт/см^2 , обеспечивается производительность не менее 400 соединений в минуту.

Промышленностью выпускаются автоматические установки для светолучевой пайки, где в качестве излучателя используются лампы ДКСШ-200 с металлическим отражателем, обеспечивающие пятно нагрева до 2,5 мм мощностью до 240 Вт/см^2 . Используется импульсный режим работы при непрерывном перемещении платы в фокальной плоскости установки. В зоне пайки лампа горит в рабочем режиме, а после прохождения ее - в дежурном. При этом термическое воздействие на основание печатной платы незначительно. Для пайки использовался припой ПОС 61, либо напрессованный на все выводы с одной стороны микросхемы, либо в виде колец или полос перфорированного припоя, надеваемого на выводы.

Лазерное излучение используется для пайки планарных выводов

ИМС и радиоэлементов к контактным площадкам печатных плат, безвыводных "чиповых" элементов на платы микросборок в виду следующих преимуществ [85]:

- высокая локализация мощности в зоне нагрева (до 1000 МВт/м^2);
- безинерционность воздействия излучения, что позволяет вести нагрев импульсами малой длительности 1–10 мс и очень точно дозировать энергию излучения;
- очень малая зона термического влияния (0,03–0,25 мм) при минимальном диаметре пятна нагрева 0,01 мм;
- не требуется вакуум, возможна работа в атмосфере любого состава;
- возможны соединения материалов с существенными различиями оптических, теплофизических и механических свойств;
- расфокусировка луча обеспечивает необходимый для пайки уровень плотности энергии;
- лазерные установки легко поддаются автоматизации путем применения микропроцессоров и транспортных систем.

Источником лазерного излучения являются оптические квантовые генераторы ОКГ, которые по агрегатному состоянию рабочего вещества подразделяются на газовые, жидкостные и на твердом теле. В зависимости от способов возбуждения рабочего вещества ОКГ работают с оптической или химической накачкой в непрерывном или импульсном режимах, а также в режиме синхронизации модуляции.

ОКГ на неодимовом стекле и рубине имеют высокую удельную мощность до 10000 МВт/м^2 , однако их применение ограничено из-за низкой эффективности и ограниченной частоты следования импульсов ОКГ на алюмоиттриевом гранате (АИГ) с длиной волны 1,06 мкм обеспечивают также высокое значение удельной мощности до 1000 МВт/м^2 , в сочетании с высокой частотой следования (до 20 Гц) вследствие низкого порога накачки и хорошей теплопроводности рабочего вещества. Газовый лазер на СО работает с еще большей эффективностью как в непрерывном, так и в импульсном режимах, однако длина волны 10,6 мкм хорошо отражается металлами.

Алюмоиттриевый гранат - монокристаллический материал, выращиваемый с ориентацией по кристаллографической оси $\langle 100 \rangle$. Он представляет соединение Y Al O и отличается очень высокой теплопроводностью ($0,13 \text{ Вт/см}^2$), малым коэффициентом теплового расширения (6,96–10 К), высокой механической прочностью (175 МПа), а также малым порогом возбуждения. Для генерации излучения в состав АИГ введены активизирующие ионы трехвалентного неодима–

элемента из группы лантанидов - в количестве 0, 5-1% [86].

Мощность лазерного излучения 125 Вт в лазере достигается благодаря использованию 2-х активных элементов в излучателе. Коэффициент пропускания выходного зеркала (до 20 %) является оптимальным и обеспечивает максимальную мощность лазерного излучения при номинальном токе через лампу накачки. Активный элемент и лампа накачки размещаются в непосредственной близости друг от друга и помещаются в отражатель, повышающий долю энергии светового излучения лампы, которая подается внутрь активного элемента (рис. 5.13).

Основным элементом излучателя является квантрон, в состав которого входят активный элемент, отражатель, корпус, штуцера охлаждения, фланцы и втулки крепления. Отражатель представляет собой моноблок из легированного европием кварцевого стекла в форме эллиптического цилиндра с полированной боковой поверхностью, покрытой слоем серебра. На внешний слой серебра нанесено защитное покрытие из меди и никеля.

Кварцевое стекло отражателя с легирующими добавками не пропускает вредное для активного элемента ультрафиолетовое излучение лампы накачки, что позволяет использовать во внутреннем контуре системы охлаждения лазера дистиллированную воду без каких-либо фильтрующих добавок и тем самым значительно повышает эксплуатационные свойства лазера. Благодаря эллиптической форме отражателя распределение накачки по сечению активного элемента имеет максимум в центральной части, что увеличивает эффективность генерации излучения.

Активный элемент ГП 6, 3 x 100 выполнен в виде круглого стержня диаметром 6,3 мм и длиной 100 мм, изготовлен из монокристалла аллюмоиттриевого граната, активированного трехвалентными ионами неодима (АИГ). Резонатор излучателя образован 2-мя зеркалами с многослойными диэлектрическими отражающими покрытиями. Основу зеркал составляют подложки, имеющие вид шайб диаметром 40 мм, толщиной 4 мм, изготовленные из стекла КУ - 1. Выходное зеркало имеет коэффициент пропускания 20 ± 2 %, а глухое - не менее 0,2 %. Изменение положения поверхности зеркала относительно оси лазерного излучения осуществляют путем поворота юстировочных винтов.

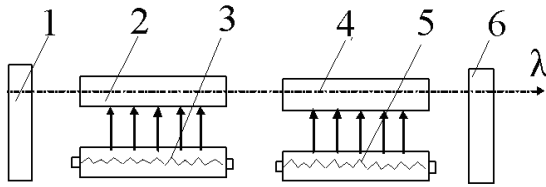


Рис. 5.13. Схема излучателя: 1 - глухое зеркало, 2, 4 - активные элементы, 3, 5 - лампа накачки, 6 - выходное зеркало

Система охлаждения лазера - жидкостная 2-х контурная с теплообменным устройством типа "вода-вода" с термостабилизацией охлаждающей жидкости, циркулирующей по замкнутому контуру при помощи жидкостного насоса УО-1. В качестве охлаждающей жидкости в лазере используется вода. Наряду с хорошими теплофизическими характеристиками, доступностью и безопасностью вода имеет высокие стабильные коэффициенты пропускания излучения, оптической накачки и способностью отфильтровывать инфракрасную часть спектра. Во внутреннем контуре используют только дистиллированную воду.

Средняя мощность излучения в импульсе определяется как [87]:

$$P = \frac{E}{t}, \quad (5.34)$$

где E - энергия излучения; t - длительность импульса.

При использовании непрерывного излучения лазера длительность воздействия определяется как:

$$t = \frac{d}{V}, \quad (5.35)$$

где d - диаметр луча; V - скорость сканирования платы относительно луча.

Тогда средняя мощность излучения равна:

$$P = \frac{EV}{d}, \quad (5.36)$$

а средняя плотность мощности излучения для луча круглой формы

$$E = \frac{1,27EV}{d^3}. \quad (5.37)$$

Для оценки мощности лазерного излучения используют измеритель средней мощности и энергии импульсов ОКГ ИМО-2 с погрешностью 10 % .

Лазерный луч вследствие уникальных технологических особенностей: узкая направленность, локальность теплового воздействия, высокая регулируемость является универсальным инструментом бесконтактной пайки безвыводных элементов на платы микросборок. Энергия поглощенного излучения E определяется:

$$E = q \cdot S \cdot \tau, \quad (5.38)$$

где q - плотность мощности излучения, S - площадь облучения, τ - время.

Поток энергии, падая на плоскую поверхность, нагревает ее до температуры T_s [88]:

$$R = \frac{k}{\alpha} \sqrt{\frac{q}{t}}, \quad (5.39)$$

где R - коэффициент отражения поверхности, k - коэффициент теплопроводности, α - коэффициент температуропроводности, t - время нагрева.

Уравнение справедливо до начала плавления, поскольку при плавлении поглощаемая энергия расходуется на скрытую температуру плавления. Ввиду нелинейности проникновения излучения задача вычисления границы продвижения расплава достаточно сложна. Приближенно время достижения температуры плавления на поверхности под действием лазерного излучения можно оценить:

$$t_{nl} \approx \frac{1}{\alpha} \left(\frac{\rho c T_{nl}}{Aq} \right)^2, \quad (5.40)$$

где ρ - плотность металла, c - удельная теплоемкость, A -

коэффициент поглощения излучения ($A=1-R$).

Физическими основами электронно-лучевого нагрева и распространения пучка закладываются новые принципы технологии пайки. При электронно-лучевой пайке нагрев места пайки идет с поверхности небольшим проникновением в металл и отдельно от основной массы деталей и оправки, поэтому скорость подъема температуры ограничена только пределом плотности мощности пучка, при котором происходит оплавление основного металла, и достигается $100^{\circ}\text{C}/\text{мин}$, что позволяет повысить производительность процесса пайки для большого числа изделий в 5–10 раз. Электронно-лучевая пайка имеет следующие преимущества [89]:

- возможность использования тугоплавких припоев с температурой плавления $1600\text{--}2000^{\circ}\text{C}$;

- локальный нагрев способствует меньшему растворению паяемых металлов и ограничивает излишнюю растекаемость припоя;

- скорость нагрева более $100^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ не способствует росту зерен тугоплавких металлов, что исключает их охрупчивание;

- дополнительная очистка паяемой поверхности в процессе пайки за счет электронной бомбардировки обеспечивает хорошее затекание припоя в зазор с образованием полномерных галтелей;

- по сравнению с традиционным оборудованием для высокотемпературной пайки электронно-лучевые установки обладают в десятки раз меньшей потребляемой мощностью;

- при электронно-лучевой пайке в вакууме расход газа меньше в сотни раз;

- отсутствует необходимость использования нагревательных элементов из дорогостоящих тугоплавких сплавов.

Широкие технологические возможности электронного луча отражены на рис. 5.14. В настоящее время для технологических целей стали использовать ионные потоки. Целесообразность использования ионных потоков для технологических процессов определяется тем, что, хотя при равном ускоряющем напряжении и равных токах электронный и ионный потоки переносят одинаковую энергию, однако импульс, переносимый каждым ионным значительнее выше импульса, переносимого электроном [90]:

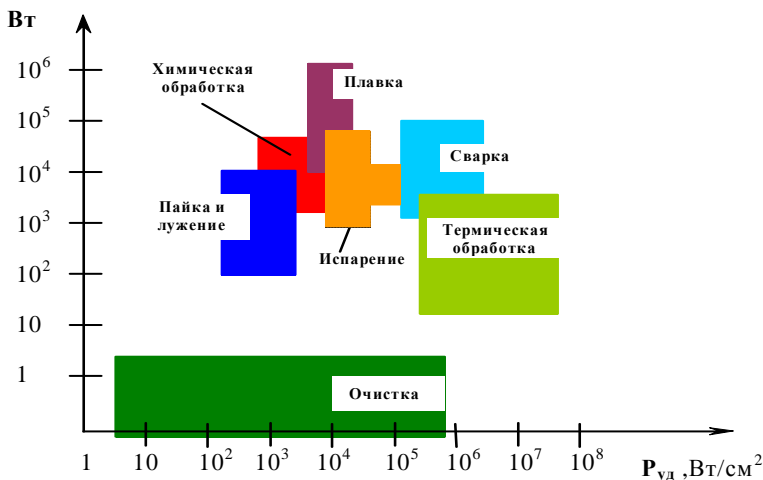
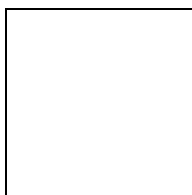


Рис.5.14. Диапазон удельных поверхностных мощностей электронно-лучевой технологии



(5.41)

где P_i - импульс иона; P_e - импульс электрона; M_i - масса иона; M_e - масса электрона; N - кратность ионизации.

Так как масса самого легкого иона H в 1840 раз больше, чем масса электрона, значит импульс, переносимый ионами, на два порядка превышает импульс, переносимый электронами. При использовании потока многозарядных ионов (N больше 1) это преимущество ионного потока еще более усиливается. При взаимодействии ионного потока с кристаллической решеткой в силу закона сохранения количества движения, ионы решетки получают значительно больше кинетической энергии, чем при взаимодействии с электронным потоком. Разрушение кристаллической решетки при взаимодействии с ионным потоком будет происходить значительно интенсивнее. Следовательно, ионные потоки обладают значительно большими технологическими возможностями, чем электронные.

Использование энергии потоков ускоренных ионов или электронов, фокусируемых в виде луча на поверхность паяемых деталей с помощью

электростатических и электромагнитных линз в вакууме позволяет достичь высоких удельных плотностей мощности нагрева, обеспечивает быстроту и локальность нагрева, позволяет точно управлять тепловой энергией. Воздействуя ионным лучом на поверхность детали можно осуществить очистку от загрязнений и окисной пленки. После совмещения деталей сборку подвергают повторному облучению, расплавляя припой и соединяя детали после охлаждения. Недостатком такого способа активации является необходимость высокого вакуума, сложного технологического оборудования, что ограничивает производительность и возможности групповой пайки.

Для процессов лужения и пайки изделий перспективным направлением является использование низкоэнергетичных ионных потоков. Используя достаточно высокий вакуум (10^{-2} – 10^{-3}) и варьируя энергией и плотностью потока ионов, можно совмещать процессы подготовки к лужению и пайке с самим процессом пайки и лужения. При этом процессы протекают в контролируемой атмосфере, что позволяет резко увеличить их чистоту и воспроизводимость и повысить процент выхода годных приборов.

Для реализации данных условий эффективно использование энергии ускоренных ионов инертных газов. Одним из основных процессов, протекающих при бомбардировке твердых тел ионами, является ионное распыление, т. е. удаление поверхностных атомов твердого тела. Следовательно, это будет способствовать эффективному удалению окисной пленки и загрязнений. Важной особенностью взаимодействия ионов с твердым телом является то, что более 90 % энергии иона переходит в тепловые колебания атомов твердого тела, т. е. расходуется на разогрев обрабатываемого материала [90].

Взаимодействие иона с жидким припоем характеризуется физическим явлением, известным под названием «ионный ветер». Оно заключается в передаче импульса (количества движения) ионов расплавленному припою. Под действием этого импульса может происходить перемещение верхнего слоя жидкого припоя, что будет способствовать увеличению степени его растекания на поверхности материала. Ионная бомбардировка также активирует атомы поверхностного слоя, что стимулирует физико-химическое взаимодействие между компонентами обрабатываемых материалов, в нашем случае - между припоем и материалом.

Глава 6. ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПАЙКИ СОЕДИНЕНИЙ

6.1. Пайка волноводов и элементов СВЧ трактов

Пайку волноводов и трактов СВЧ выполняют в поле токов ВЧ, в печах или в ваннах с расплавленной солью. Высокочастотная (индукционная) пайка основана на разогреве паяемых деталей под действием электромагнитного излучения. Воздействие энергии ВЧ электромагнитных колебаний на паяемые детали и припой проявляется в виде высокопроизводительного бесконтактного нагрева паяемых деталей до температуры пайки с помощью наведенных в металле вихревых токов. При этом скорость нагрева может быть увеличена до 10 раз по сравнению со способами пайки летучим теплоносителем, область пайки локализуется в пределах $5\text{--}10\text{ мм}^2$, определяемых конструкцией индуктора.

Высокая скорость нагрева токами ВЧ достигается соответствующим выбором частоты тока. Поскольку плотность токов ВЧ по сечению детали распределяется неравномерно, а увеличивается к поверхности вследствие поверхностного эффекта, то выбор частоты нагрева зависит от соотношения глубины проникновения токов ВЧ в металл и толщины детали. Нагрев электромагнитными колебаниями средней частоты $60\text{--}300\text{ кГц}$ с интенсивностью $1\text{--}100\text{ МВт/м}^2$, при котором отношение глубины проникновения к толщине детали h находится в пределах $\delta/h < 0,5\text{--}1,0$, используется для конструкционной пайки деталей, в частности: волноводных трактов, корпусов металлобумажных конденсаторов, коммутационных элементов, и т.д.[56,91].

Вследствие поверхностного эффекта тепловая энергия локализуется в тонком слое, толщина которого определяется глубиной проникновения токов ВЧ. Учитывая габаритные размеры и материал соединяемых деталей, подбирают частотный режим пайки. Для толстостенных изделий применяют низкочастотный нагрев в диапазоне $10\text{--}60\text{ кГц}$, для тонкостенных — высокочастотный в диапазоне $200\text{--}1000\text{ кГц}$ [92, 93].

Технологической оснасткой для пайки токами ВЧ является индуктор, представляющей собой катушку, изготовленную из высокопроводящего трубчатого материала, через которую для охлаждения интенсивно прокачивается охлаждающая жидкость (рис.6.1), а в качестве оборудования — генератор токов ВЧ.

Термический КПД нагрева системы «круговой индуктор — деталь» рассчитывают по формуле [94]:

$$\eta_T = \frac{1}{1 + \frac{D_I^2}{D_D^2} \cdot (1 + 6,25 \frac{\delta^2}{D_D^2}) \cdot \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu \cdot \rho_2}}}, \quad (6.1)$$

где D_I и D_D — диаметры индуктора и детали; ρ_1 и ρ_2 — удельные электрические сопротивления материалов индуктора и детали; μ — магнитная проницаемость материала детали. Из (6.1) следует, что КПД тем выше, чем больше значения ρ_2 и μ имеет нагреваемый материал (для сталей $\eta_T = 0,7-0,8$, для меди и медных сплавов $0,5-0,6$).

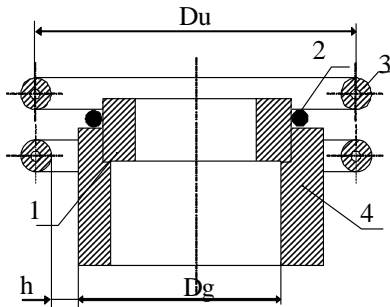


Рис. 6.1 Схема нагрева при ВЧ пайке: 1, 2—соединяемые детали, 3—припой, 4— индуктор

Эффективность нагрева повышается, если на поверхности паяемой детали по периметру соединения сформировать короткозамкнутый контур с малым удельным сопротивлением. Это позволит локализовать энергию и исключить перегрев внутреннего объема.

ВЧ пайка применяется для соединения элементов СВЧ (волноводных звеньев, магнетронов, ламп бегущей и отраженной волны) и для герметизации микросборок в металлических корпусах. Она позволяет производить процессы с высокой скоростью, одновременно паять несколько швов сложной пространственной конфигурации. Предварительный подогрев деталей обеспечивает повышение скорости процесса из-за быстрого выравнивания температуры по всему соединению и улучшения его качества за счет устранения теплового удара. Качество соединений повышается при проведении процесса в вакууме или среде очищенных газов (водород, азот или их смесь). Процесс легко автоматизируется и встраивается в конвейерные линии

сборки. Дозированное нанесение припоя на собранные в держателе или кассете детали осуществляется программируемым манипулятором. Его существенным недостатком является необходимость изготовления специальной оснастки для каждой сборки паяемых деталей [95].

Пайка в печи с контролируемой атмосферой обеспечивает равномерность нагрева, точность поддержания температуры и времени выдержки, стабильность качества, легко поддается автоматизации, устраняет операции флюсования и последующей очистки. Нагрев паяемых деталей осуществляется в активной газовой среде, подвергнутой специальной очистке и осушению (водород, диссоциированный аммиак, водяной газ), в инертной или в вакууме. Правильный выбор режима пайки позволяет совместить ее с последующей термообработкой соединения [96]. Проведение кристаллизации паяных швов под повышенным газовым давлением позволяет значительно улучшить прочностные и электрические характеристики соединений [97]. Приложение давления в процессе формирования соединений обеспечивает более равномерное распределение припоя, удаление неметаллических включений, уменьшению количества жидкой фазы в шве [98].

Пайка в ваннах с расплавленной солью применяется для сборки крупногабаритных изделий. Состав расплава подбирается таким образом, чтобы он обеспечивал требуемую температуру и оказывал флюсующее действие на соединяемые поверхности. Это в основном хлористые соединения калия, лития, натрия, бария, кальция. Собранные под пайку узлы (зазор 0,05–0,1 мм) предварительно нагревают в печи до температуры на 80–100°C ниже температуры плавления припоя [99]. Такая подготовка снижает коробление деталей и не нарушает температурный режим ванны. После выдержки в расплаве в течение 0,5–3,0 мин детали вместе с приспособлением извлекают из ванны, и после охлаждения тщательно промывают для удаления остатков флюса.

6.2. Монтаж микроплат в корпуса микроблоков

Технология сборки многофункциональных модулей СВЧ, применяемых в приемопередающей аппаратуре телекоммуникационных линий, авиационной и космической аппаратуре, отличается высокой трудоемкостью, особыми требованиями к взаимному расположению элементов, минимальными потерями сигналов в СВЧ диапазоне, необходимостью обеспечения высоких удельных значений рассеиваемой тепловой мощности [100]. Особое внимание при сборке

модулей уделяется монтажу микроплат с компонентами в корпус, что позволит не только сократить трудоемкость, но и повысить выход годных изделий [101].

Методы монтажа микроплат в модули с помощью винтов или эпоксидного клея с металлическим наполнителем [102] не обеспечивают низкого теплового сопротивления контакта. При сборке СВЧ многофункциональных модулей и микросборок надежный омический контакт платы с корпусом при низком тепловом сопротивлении и высокой механической прочности соединения достигается пайкой легкоплавкими припоями. При этом важно обеспечить непрерывный и равномерный по толщине паяный шов и отсутствие остатков флюсов и загрязнений в изделии. Существующие способы монтажа микроплат в корпуса модулей СВЧ методом пайки с использованием спирто-канифольных флюсов имеют существенные недостатки:

- невозможность полной очистки остатков флюса ухудшает параметры микрополосковых устройств, снижает их надежность;
- неполное смачивание припоем паяемой поверхности плат (60–70%) ухудшает тепловое сопротивление перехода плата-корпус.

Для повышения надежности соединений платы с основанием корпуса применяли свинцовые прокладки с легкоплавким покрытием оловом, что позволило получить соединения с гарантированной толщиной паяного шва около 0,1 – 0,25 мм, а также уменьшить уровень термомеханических напряжений в соединении при термоциклировании: –60°С в течении 30 мин, нагрев до +85°С в течении 30 мин, что соответственно уменьшает опасность растрескивания плат из-за различного ТКЛР платы и корпуса при циклическом воздействии температур [103].

Аналогичные результаты были получены в использовании припойной прокладки, армированной медной сеткой толщиной 0,2 мм с размером ячеек 0,7×0,7 мм, проложенной перед пайкой между микрополосковой платой и основанием корпуса (рис.6.11). Однако использование сеток увеличивает объем подготовительных работ, усложняет технологический процесс и не устраняет дефектов флюсовой пайки.

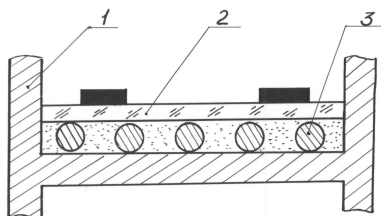


Рис.6.11. Схема флюсовой пайки микроплат: 1–корпус, 2– микроплата, 3–сетка

Одновременное присоединение микроплат к корпусу и компонентов на платы с помощью паяльной пасты и ее оплавления в печи (“сэндвич” технология–Sandwich Soldering Technology), сокращая длительность технологического процесса, создает значительные тепловые нагрузки на компоненты, что может в ряде случаев ухудшить электрические параметры микросборок. После пайки требуется тщательное удаление остатков флюса промывкой в УЗ ванне [104].

Более перспективны способы бесфлюсовой пайки, основанные на удалении оксидов за счет диссоциации в вакууме или атмосфере инертных газов, восстановления их в активной газовой среде, а также с помощью механических колебаний. Диссоциация оксидов в вакууме или их восстановление в активной среде требует высоких температур, специального вакуумного оборудования и сопровождается насыщением расплавленного припоя водородом или аргоном, что приводит к образованию пористого паяного шва.

При механическом способе удаления оксидных пленок в момент расплавления припоя одной из паяемых деталей, например, плате, сообщают низкочастотные колебания частотой 20–60 Гц с помощью вибратора (рис. 6.12). Перемещение паяемых поверхностей относительно друг друга в параллельных плоскостях с амплитудой до 1 мм, создаваемой вибратором установок пайки ЭМ–415, ЭМ–445, позволяет разрушить механическим путем оксидные пленки на припое [105]. Прочность на срез паяных соединений припоем ПОИн 50 составила до 12 МПа, что в 2 раза больше, чем при флюсовой пайке в среде водорода. Вследствие приложения колебаний, параллельным паяемым поверхностям, дефекты в зоне пайки имеют направленный характер и их площадь не превышает 10%. Однако такой способ пайки притиркой достаточно длителен (от 30 до 90с), требует увеличения габаритов микроблока на двойную амплитуду колебаний плат и не обеспечивает полного удаления остатков оксидов из зоны пайки. Кроме

того, прочность соединений зависит от частоты колебаний, которые активизируют диффузионные процессы при длительном времени пайки, приводящие к образованию слоя интерметаллида толщиной до 9 мкм [106].

Колебания, создаваемые в паяемых деталях параллельно паяемой поверхности (вибрационная пайка) вызывают удаление окисной пайки с поверхности расплавленного припоя механическим путем и используются при посадке кремниевых кристаллов ИМС в корпус методом эвтектической пайки с использованием золотой фольги, а также монтажа микроплат на сменные держатели низкотемпературной пайкой припоями ПОИн 52 или ПОС 61 [107].

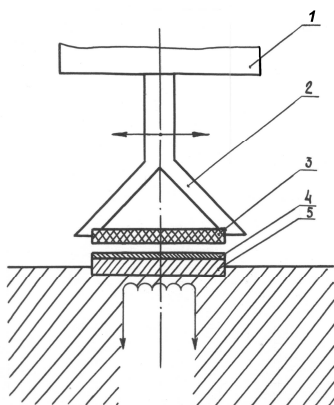


Рис. 6.12. Схема монтажа микроплат вибрационной пайкой

При посадке кристалла на эвтектику Au–Si, образующуюся в процессе пайки взаимным растворением материала кристалла и золотого покрытия при 380–400⁰С при вибрации ускоряют разрушение окисной пленки на кремнии. Оптимальная толщина эвтектического слоя достигает 5–7 мкм, площадь эвтектики под кристаллом - не менее 70%, содержание кремния 2,4–2,8%. При пайке кристалла на его площадь напыляют слой олова до 1 мкм, соединение с золоченой поверхностью корпуса осуществляется за счет образования эвтектики Au–Si (20% Au) имеющий температуру плавления 280⁰С. Пайка происходит при температуре 320–350⁰С с применением вибраций. Максимальное давление, создаваемое вибратором в расплаве припоя равно:

$$P_{\max} = 2\pi \cdot fA . \quad (6.1)$$

На частоте 50 Гц и при амплитуде 1 мм в расплаве максимальное

давление составляет 5 МПа, что достаточно только для вытеснения оксидных пленок из зоны пайки.

Исследована бесфлюсовая вибрационная пайка пластин из труднопаяемых материалов, таких как сапфир, поликор, керамика и ферриты эвтектическим припоем Al-Ge при температурах 430–460°C [108].

Прочность на сдвиг паяных соединений ферритовых СВЧ приборов должна быть не менее 2,5–4,4 МПа для оловянно–свинцовых припоев и 0,58–0,64 МПа для оловянно–индиевых после воздействия термических циклов испытаний изделий [109].

Применение УЗ колебаний частотой 18,0–23,0 кГц позволяет полностью отказаться от применения флюсов, при этом исключается операция отмывки флюса, сокращается общая длительность технологического процесса посадки микроплаты. При прохождении упругих механических колебаний УЗ частоты через расплав припоя в последнем возникает явление кавитации, микропотоки, что и обеспечивает разрушение оксидных пленок и полное смачивание припоем паяемых поверхностей.

Разработан процесс бесфлюсовой пайки микрополосковых плат под воздействием УЗ и ИК энергии и определены его оптимальные режимы [110]. Паяемые поверхности плат размером 48x60 мм с металлизированным покрытием хром-медь и гальваническим покрытием золотом 3 мкм или сплавом олово-висмут 6 мкм монтировались в корпуса модулей размером 110x54x20 мм. Корпуса, изготовленные из дюралюмина Д16Т, химически покрывались никелем, а затем сплавом олово – висмут толщиной 6–9 мкм. Паяемые поверхности плат и корпуса обезжиривались спирто–бензиновой смесью.

Для осуществления процесса бесфлюсовой пайки микролат к основанию корпус устанавливался между двумя УЗ системами, расположенными соосно (рис. 6.13). Для надежной передачи энергии УЗ колебаний корпусу волновода обеих систем были прижаты к нему с усилием 100–150 Н. Напряжение УЗ частоты от генератора УЗГ5–0,4 поступало на обмотки магнитострикционных преобразователей, соединенных последовательно. Преобразователи настраивались на резонансную частоту с помощью параллельной схемы компенсации реактивного сопротивления преобразователей.

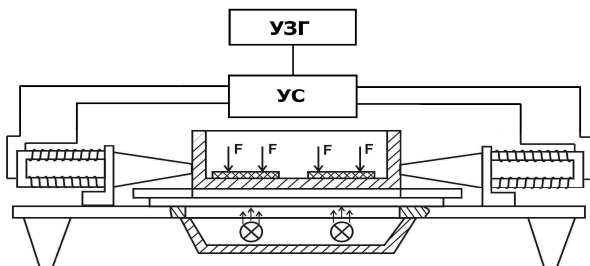


Рис. 6.13. Устройство УЗ пайки микроплат

Корпус нагревался за счет ИК энергии от 2-х кварцевых галогенных ламп КИ-220-1000, закрепленных в диффузных отражателях с экранами из алюминиевой фольги и охлаждаемых проточной водой. Температура измеряли с помощью хромель-копелевой микротермопары диаметром 0,4 мм, закрепленной на поверхности корпуса, выводы которой соединялись с электронным потенциометром КСП-4, управляющим напряжением питания ИК ламп с помощью блока силовых реле. В процессе пайки к плате прикладывали статическое усилие величиной 1–5 Н, создаваемое подпружиненными штырьками в 4-х точках платы.

Для бесфлюсовой УЗ пайки микроплат в корпуса многофункциональных модулей СВЧ диапазона разработана и изготовлена установка, состоящая из двух УЗ-систем, двух модулей ИК нагрева, УЗ генератора и программного устройства управления (рис. 6.14). Для повышения качества паяных соединений сведены к минимуму дифракционные явления и эффекты суперпозиции акустических волн за счет девиации частоты. Оптимизирована толщина припоя в соединении и исключен эффект его распыления в местах подвода УЗ колебаний. Для исключения воздействия ИК излучения и УЗ колебаний на обслуживающий персонал применено экранирование устройства. Рабочий диапазон частот УЗ колебаний 20–22 кГц с девиацией частоты 1 кГц. При температуре 150–250°C время УЗ пайки не более 25 с. Мощность УЗ колебаний –0,4 кВт, ИК нагревателей 2,0–4,0 кВт.

Для эффективного разрушения окисных пленок и равномерного смачивания всей поверхности платы припоем в корпусе создавали режим бегущей волны изменением длин волн на $\lambda/16$ и $\lambda/32$ или частоты на 1,2 и 0,6 кГц [111]. Плавную перестройку частоты генератора осуществляли с помощью блока девиации частоты. Интенсивность ультразвука при средней частоте преобразователя 20

кГц и амплитуде колебаний 10 мкм составила $18,3 \cdot 10^4$ Вт/м². Кавитационное давление в расплавленном припое измеряли кавитометром с помощью выносного измерительного щупа, соединенного с пьезоэлектрическим преобразователем. Кавитометр позволял измерять давление от 5 до $3 \cdot 10^4$ Па в кавитационной области размером $1,0 \cdot 10^{-4}$ м² в диапазоне частот работы УЗ преобразователей от 18 до 50 кГц. Амплитуду колебаний рабочего инструмента контролировали с помощью бесконтактного виброметра.



Рис. 6.14. Установка УЗ пайки микроплат

Сплошность паяного шва проверяли на рентгенотелевизионном микроскопе МРТ-2Р. Прочность паяных соединений на сдвиг определяли на машине типа РП-100. Степень смачиваемости плат S_n/S_0 оценивали при отделении плат от корпуса подсчетом площади, покрытой припоем, на микроскопе МБС-9, и исследовали в зависимости от амплитуды и частоты колебаний, времени воздействия, температуры пайки, усилия прижима плат к корпусу, толщины прокладки припоя.

Хорошее смачивание для всех видов покрытий и припоев достигнуто при амплитуде УЗ колебаний, равной 10 мкм, что соответствовало выходному напряжению генератора 50 В и току подмагничивания 2 А. Увеличение амплитуды колебаний до 20 мкм не приводит к дальнейшему возрастанию степени смачивания, так как при значительной интенсивности УЗ колебаний, вводимых в припой, в большей степени растут и процессы окисления припоя. При амплитудах выше 20 мкм возможно распыление припоя в местах пучностей колебаний и загрязнение им поверхности плат. Достаточно высокая смачиваемость поверхности плат (98–99) % достигнута в течение 15 с воздействия ультразвука для припоя ПОС61 и гальванического покрытия платы сплавом олово-висмут. Это объясняется лучшей жидкотекучестью ПОС 61 по сравнению с припоем ПОИ 50, а также

тем, что при пайке оловянно-висмутовых покрытий не образуются интерметаллиды.

Процесс смачивания припоем ПОС 61 золотых покрытий сопровождается интенсивным растворением золота в припое со скоростью, достигающей при 250°C 4 мкм/с, и образованием преимущественно хрупких интерметаллидов AuSn_4 и AuSn_2 , что приводит к снижению прочности паяного соединения, особенно при термоциклировании. При смачивании золотых покрытий припоем ПОИ 50 происходит образование интерметаллидов как с оловом, так и с индием: AuIn , AuIn_2 и др., что ухудшает смачивание плат. Важное значение имеет состояние паяемых поверхностей корпуса и плат, покрытых сплавом олово-висмут. Смачиваемость гальванических матовых покрытий после длительного хранения (более 3-х месяцев) значительно ухудшается вследствие процессов старения и окисления. Для восстановления паяемости рекомендовано оплавление покрытий либо в глицерине, либо с помощью инфракрасного излучения. Блестящие покрытия сохраняют паяемость при их хранении в течение 12 и более месяцев.

Смачивание различных покрытий припоями в УЗ поле в значительной степени определяется кавитационным давлением. Максимальное значение кавитационного давления 6,6 кПа достигнуто на резонансной частоте преобразователя 21,3 кГц. Изменение частоты на величину, соответствующую $\lambda/16$, то есть на 0,6 кГц, снижает кавитационное давление в припое в среднем на 55%, но при этом величина кавитационного давления составляет 2,7–2,8 кПа и достаточна для эффективного удаления окисных пленок и осуществления бесфлюсовой пайки плат.

Наилучшая смачиваемость (до 99%) достигнута для ПОС61 и оловянно-висмутовых покрытий в диапазоне температур $220\text{--}240^{\circ}\text{C}$, для ПОИ50 - в пределах 97,5% в интервале температур $160\text{--}180^{\circ}\text{C}$, причем степень смачиваемости золотых и оловянно-висмутовых покрытий примерно одинакова [111]. Оптимальное усилие прижима для используемых припоев различно, что связано с их различной плотностью. Оптимальная толщина фольги в соединении $150\text{--}120$ мкм. При большей толщине избыток припоя вытесняется на наружную поверхность платы.

Исследование паяного шва на рентгенотелевизионном микроскопе МРТ-2 показало, что слой припоя в соединении непрерывный, плотный и достаточно равномерный без следов окислов или неметаллических включений. Металлографические исследования микроструктуры

паяных соединений платы с корпусом подтвердили наличие равномерной границы смачивания и образование диффузионных зон. Значительная по размерам диффузионная зона, содержащая интерметаллические соединения золота отмечена при пайке припоем ПОС61 гальванического золотого покрытия плат. Активация процесса пайки УЗ колебаниями способствует измельчению зерна интерметаллических соединений и более равномерному их распределению в диффузионной зоне.

Исследования зависимости степени смачиваемости микроплат от времени воздействия УЗ колебаний показали, что лучшее смачивание в течение 15 с получено для припоя ПОС61 и гальванического покрытия сплавом олово-висмут. Это объясняется лучшей жидкотекучестью ПОС61 по сравнению с ПОИ50, а также тем, что при пайке оловянно-висмутовых покрытий не происходит образования интерметаллидов, ухудшающих процесс смачивания, как в случае золотых покрытий [113]. Анализ зависимости степени смачиваемости от величины усилия прижима микроплаты к корпусу (рис. 6.15) показал, что оптимальным усилием в случае ПОС61 является 3-5 Н, для ПОИ50–1–2 Н. Это обусловлено различной вязкостью припоев в УЗ поле и процессами внешнего трения между жидким припоем и поверхностями микроплаты и корпуса. Оптимальными параметрами процесса УЗ бесфлюсовой пайки микроплат являются: частота колебаний 20–22 кГц; изменение частоты 1,2 кГц; температура для припоя ПОС61 220–240 °С, ПОИ50 150–170 °С; время 15–20 с; усилие прижима к корпусу (ПОС61 3–5 Н, ПОИ50 1–2 Н); толщина фольги припоя 100–150 мкм. Смачиваемость паяемых поверхностей припоем составляет не менее 97–98 % .

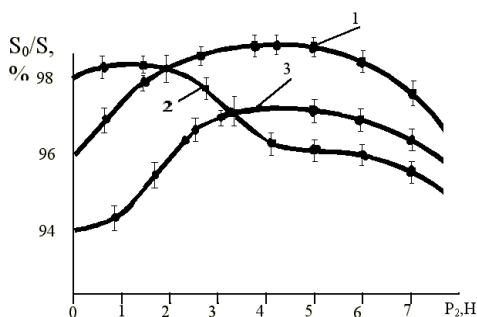


Рис. 6.15. Зависимости степени смачиваемости микроплат от усилия прижима к корпусу: покрытие олово-висмут, припой ПОС 61 (1), припой ПОИ50 (2); покрытие золотом, припой ПОС 61 (3).

Прочность паяных соединений плат с корпусом припоем ПОИ 50, выполненных бесфлюсовой пайкой, для гальванических покрытий сплавом олово-висмут и золота составило 9,81 и 7,45 МПа, для ПОС 61 – 19,8 и 8,3 МПа соответственно, что сравнимо с прочностью соединений при вибрационной пайке и в 1,5–2 раза выше для флюсовой пайки.

Результаты исследований влияния амплитуды и времени воздействия ультразвука на рабочие параметры СВЧ транзисторов типа 2Т3115Б, закрепленных на контактных площадках термокомпрессионной сваркой, показали, что изменение параметров транзисторов незначительно (5%), что согласуется с известными данными по влиянию теплового воздействия пайки на рабочие параметры изделий микроэлектроники.

При монтаже микроплат в корпусе многофункциональных модулей УЗ волна длиной λ_1 имеет минимум колебаний примерно в середине изделия. Для того, чтобы в данном месте обеспечить эффективное удаление окисных пленок с паяемых поверхностей корпуса и микрополосковой платы необходимо подать колебания с длиной $\lambda_2 = \lambda_1/2$ с другой стороны изделия, что обеспечит в середине изделия пучность амплитуды. Для улучшения смачивания припоем паяемых поверхностей микрополосковых плат при более равномерном распределении амплитуды УЗ колебаний вдоль паяемой поверхности корпуса и образованием однородного по толщине и непрерывного паяного шва возбуждали в корпусе УЗ колебания поочередно с диаметрально противоположных сторон корпуса с длинами волн, взятыми в соотношении $\lambda_1 / \lambda_2 = 1-4$ и амплитудами колебаний в соотношении $A_1/A_2 = 1-4$. Средняя акустическая мощность $P_{a,cp}$ зависит от частоты, и от амплитуды колебаний:

$$P_{a,cp} = 0,5 A^2 f^2 \rho c S, \quad (6.2)$$

где ρc - волновое сопротивление материала, S – площадь основания.

Часть энергии, которая переносится УЗ волнами, поглощается средой, и амплитуда звукового давления уменьшается по закону:

$$\Delta P_d = \Delta P_o e^{-\frac{d}{d_e}}, \quad (6.3)$$

где ΔP_o – амплитуда давления входящих в среду волн, ΔP_d – амплитуда после прохождения расстояния d , d_e – расстояние, на котором амплитуда давления уменьшается в e раз. В связи с тем, что

коэффициент поглощения незначителен $5,5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2/\text{с}$, а расстояние распространения волны мало, то потерями УЗ энергии при расчетах можно пренебречь.

Распространение бегущей УЗ волны при ее девиации приведено на рис. 6.16. При длине равной $\lambda/4$ и $3\lambda/4$ амплитуда колебаний равна нулю. Вследствие девиации частоты на величину, соответствующую $\lambda/8$, происходит смещение максимумов и узлов колебаний относительно длины корпуса, что позволит достигнуть высокой смачиваемости поверхности платы припоем (рис.6.17).

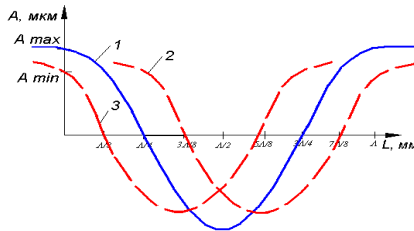


Рис. 6.16. Распространение УЗ волн в корпусе модуля:
1- $f_{рез}$, 2- $(f_{рез}+\Delta f)$, 3- $(f_{рез}-\Delta f)$

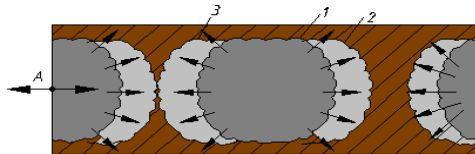


Рис. 6.17. Схема действия микропотоков в расплаве припоя:
1- $f_{рез}$, 2- $(f_{рез}+\Delta f)$, 3- $(f_{рез}-\Delta f)$

Возбуждение УЗ колебаний возможно осуществлять в импульсном режиме с частотой импульсов 0,5-10 Гц скважностью от 2 до 6 с целью исключения образований суперпозиций волн, приводящих к образованию узлов и пучностей амплитуды смещений в припое, а также значительных циклических напряжений в паяемом изделии. Это обеспечивает одновременное разрушение оксидных пленок по всей паяемой поверхности микрополосковой платы за счет развития однородного кавитационного процесса в расплавленном припое и создало условия для более полного смачивания припоем поверхности платы между платой и основанием корпуса без применения флюсов. В конечном итоге снижено тепловое сопротивление контакта плата-корпус и устранена опасность развития коррозионных процессов, что в итоге способствовало повышению надежности изделия.

На частоте УЗ колебаний, подаваемых от одного генератора 22 кГц, длина волны λ_1 составляла 0,28 м, а амплитуда колебаний волновода 20 мкм. Частота другого генератора составляла 44 кГц, длина волны λ_2 – 0,14 м, а амплитуда колебаний – 15 мкм. При времени пайки 10 с смачивание паяемых поверхностей припоем составило 98–99%. Изделия при испытании выдержали до 10 термоциклов.

Эффективность процесса УЗ пайки микроплат заключается в повышении качества паяных соединений за счет улучшения смачивания припоем паяемых поверхностей плат, образования однородного по толщине и непрерывного паяного шва, исключения использования флюса. Эксплуатационная надежность и долговечность изделий повышены за счет уменьшения теплового сопротивления контакта плата–корпус, увеличения теплоотвода от элементов платы, и повышения в 3–5 раз стойкости изделия к циклическим, механическим и тепловым нагрузкам.

6.3. Герметизация корпусов микроблоков пайкой

Для герметизации металlostеклянных и металлокерамических корпусов ИМС и БИС применяют пайку легкоплавкими припоями типа ПОС61, ПОИ 50 и др. Для обеспечения бесфлюсовой пайки соединяемые кромки корпуса и крышки покрывают золотом толщиной 3–5 мкм. Для пайки применяют различные способы нагрева: контактный корпуса снизу на плитке, косвенный крышки с помощью нагревателя, устанавливаемого по периферии шва, горячим газом [114].

Герметизация корпусов микроблоков является одной из наиболее ответственных операций, поскольку от ее качества во многом зависит надежность работы аппаратуры. Герметизация микроблоков в настоящее время осуществляется путем пайки или с помощью эластичных уплотнений, что обеспечивает ремонтпригодность микроблока [115].

При повышенных требованиях к герметичности применяют вакуум-плотную герметизацию с укладкой в зазоре между крышкой 2 и корпусом 1 по всему периметру уплотнительного шнура из нагревостойкой резины 4. На прокладку по всему периметру накладывают стальную облуженную проволоку 3 диаметром 0,8 мм, образуя зазоры 0,1–0,2 мм для заполнения припоем 5 (рис. 6.7). Пайку проводят припоем ПОИ-50 с использованием спирто–канифольного флюса ФКСп. Один из концов проволоки выводится из зазора через паз в крышке и дает возможность вскрыть крышку, вырвав проволоку из

шва. После ремонта допускается повторная герметизация пайкой.

Пайка микроблоков вручную паяльником мощностью 200 Вт или с нагревом на плитке имеет низкую производительность и невысокое качество паяных соединений. При этом трудно обеспечить однородность и равномерность паяного шва, что отрицательно сказывается на качестве герметизации микроблока. Для снижения нагрева термочувствительных элементов требуется принудительное конвективное охлаждение отбором газового потока из полости корпуса [116].

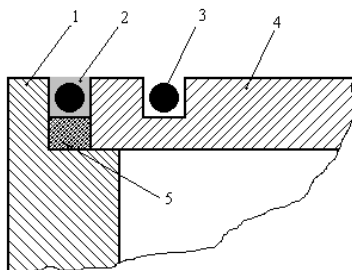


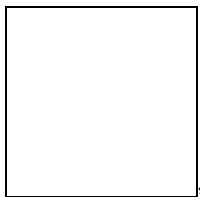
Рис. 6.7. Схема герметизации пайкой с уплотнительной прокладкой

Активация процесса пайки энергией высокочастотного электромагнитного (ВЧ) поля частотой 250-1600 кГц позволяет увеличить скорость нарастания температур до 10 раз по сравнению с пайкой паяльником за счет бесконтактного нагрева вихревыми токами ВЧ, локализовать зону пайки и снизить тем самым общий нагрев изделия, активировать припой за счет его эффективного перемешивания вихревыми токами. Одновременно обеспечивается возможность автоматизации процесса герметизации, улучшаются условия труда обслуживающего персонала.

При выполнении ВЧ пайки индуктор 4 токов ВЧ, выполненный из тонкостенной медной трубки диаметром 4–6 мм, располагается на заданном расстоянии от микроблока 1 и охлаждается в процессе нагрева проточной водой (рис. 6.8). Пайка крышки 2 к корпусу микроблока 1 осуществляется с использованием дозированного кольца припоя, уложенного в зазор между ними. При пайке нижняя сторона микроблока охлаждается с помощью массивного теплоотвода. Технологические параметры процесса ВЧ пайки: расстояние 8–10 мм, частота электромагнитных колебаний 350–550 кГц, источник ВЧ энергии - генератор мощностью 5–10 кВт, время пайки 5–7 с, температура нагрева микроплаты внутри корпуса - не свыше 85–90°C

при использовании припоя ПОС61 и температуре в зоне пайки 230–240°C [71].

Выбор частоты тока осуществлялся из условия, исключающего проникновения электромагнитного поля внутрь корпуса:



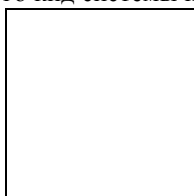
(6.6)

где δ — глубина проникновения ТВЧ в металл корпуса; h —толщина стенки корпуса.

Условие вытекает из анализа зависимости напряженности электрического поля от относительной глубины проникновения, которая свидетельствует о том, что при $x = 4\delta$, где x - текущая координата, поле практически отсутствует внутри металла. Поскольку глубина проникновения ТВЧ в металл зависит от частоты тока, удельного электрического сопротивления ρ и магнитной проницаемости μ , то нижний предел частоты тока с учетом соотношения определяется так:

$$f_{\min} \geq 4,05 \cdot 10^6 \frac{\rho}{\mu \cdot h^2} \quad (6.7)$$

Верхний предел частоты тока вытекает из требования максимальной величины термического КПД системы нагрева, при которой:



(6.8)

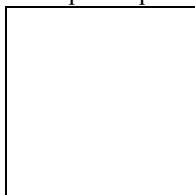
а также с учетом малых толщин стенок корпуса БИС:

$$f_{\max} < 16,2 \cdot 10^6 \frac{\rho}{\mu \cdot h^2} \quad (6.9)$$

Толщина стенок корпуса не превышала 0,3 мм, поэтому частота ВЧ-колебаний была выбрана равной 580 кГц.

При герметизации корпусов БИС ввиду малых геометрических размеров корпусов применение индукторов с числом витков более двух становится не эффективным вследствие значительного удаления

последующих витков от зоны нагрева. При расчете активного сопротивления таких маловитковых индукторов незначительных размеров, изготовленных из медной трубки с внешним диаметром D , учитывалось активное сопротивление токопровода индуктора R_{mi} , которым обычно при высокочастотном нагреве пренебрегают:



(6.10)

где ρ_m —удельное электрическое сопротивление материала индуктора-меди; Lm —длина токопровода, то есть расстояние от рабочей зоны до зажимов генератора; δm — глубина проникновения ТВЧ в медь.

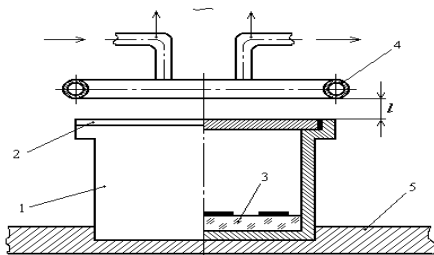


Рис. 6.8. Схема герметизации корпуса микроблока ВЧ пайкой

Для контроля герметичности корпусов применяют ряд методов: масс-спектрометрические, вакуумно-жидкостный и др. Первый основан на разделении сложной смеси газов или паров по массам с помощью электрических и магнитных полей и имеет наиболее высокую чувствительность. Изделия наполняются гелием двумя способами: герметизацией корпусов в атмосфере гелия; опрессовкой загерметизированных приборов в атмосфере гелия. Опрессовывают те ИМС, корпуса которых не подвергались окраске или лакировке, так как микроотверстия в них могут быть закрыты для доступа гелия краской или лаками.

Для опрессовки ИМС загружают в камеру из которой откачивают из камеры воздух до давления 14—7 Па, затем наполняют гелием и выдерживают в ней при давлении $(3—5) \cdot 10^{-5}$ Па в течении от 3—48 ч до 3 суток. За этот период в корпуса, имеющих течи, попадает гелий,

который остается в них некоторое время. После завершения цикла опрессовки ИМС переносят в измерительную камеру для контроля герметичности, скорость утечки гелия измеряют не позднее чем через 1,5 ч после извлечения из опрессовочной камеры с помощью гелиевого течеискателя, величина течи определяется по формуле [2]:

$$Q = \frac{U}{\epsilon} \cdot \frac{M}{M_v} \cdot \frac{\gamma}{P_1 - P_2} \cdot P_{\text{атм}} \quad (6.11)$$

где ϵ — чувствительность схемы измерения, (лПа)/(с·мВ); U — показания милливольтметра масс-спектрометра, мВ; M и M_v — молекулярная относительная масса гелия и воздуха (соответственно 4 и 29); γ — концентрация газа в приборе; P_1 — давление в откачиваемой камере; P_2 — давление газа в приборе; $P_{\text{атм}}$ — атмосферное давление.

Для гелия формула (6.11) трансформируется в вид:

$$Q = \frac{U}{\epsilon} \cdot \frac{M}{M_v} \cdot \frac{\gamma}{P_1 - P_2} \cdot P_{\text{атм}} \quad (6.12)$$

Герметичными считаются корпуса ИМС, имеющие течь менее $1 \cdot 10^{-10}$ м³Па/с. Масс-спектрометрическим методом не могут быть отбракованы ИМС с большими течами, так как введенный гелий выйдет раньше, чем они будут подвергнуты контролю, т. е. в корпусах не окажется пробного газа.

Сущность вакуумно-жидкостного метода состоит в том, что в испытуемом объеме создается давление газа, затем изделие погружается в жидкость. Испытуемые изделия выдерживают в течение 1–5 мин при давлении 10–15 Па, затем помещают в стеклянный сосуд с этиленгликолем или уайт-спиритом, который до погружения изделий вакуумируют. Образование пузырьков свидетельствует об истечении газа. По скорости образования и размерам пузырьков можно судить о местонахождении течи и ее величине. Чем выше температура жидкости

и давление, тем выше достоверность испытаний. Чувствительность этого метода контроля около $5 \cdot 10^{-8}$ м³Па/с.

Масс-спектрометрический метод имеет более высокую чувствительность ($1 \cdot 10^{-15}$ м³Па/с) и позволяет автоматизировать процесс контроля герметичности.

Глава 7. ФОРМИРОВАНИЕ МОНТАЖНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ИЗДЕЛИЯХ ЭЛЕКТРОНИКИ

7.1. Пайка и демонтаж с помощью паяльника и паяльных станций

Для формирования монтажных соединений в мелкосерийном многономенклатурном производстве широко применяют различные конструкции паяльников и паяльные станции. Стабилизацию температуры рабочего жала паяльника достигают несколькими способами:

– тиристорными терморегуляторами, состоящими из датчика температуры, закрепляемого в паяльном жале на расстоянии 30–40 мм от рабочего торца или с обратного торца и схемы управления. Точность регулирования температуры на спае термопары достигает $\pm 2^\circ\text{C}$, однако на рабочем конце жала она достигает $\pm 5^\circ\text{C}$ за счет инерционности теплового поля (прибор "Термит");

– нагревателем с переменным электросопротивлением, зависящим от температуры. Например, в монтажном паяльнике фирмы Philips нагревательный элемент состоит из агломерата свинца и бария, сопротивление которого возрастает в сотни раз при нагревании выше

точки Кюри, в результате чего сила тока снижается и паяльник остывает, а после охлаждения ниже точки Кюри процесс развивается в обратном порядке;

- использованием магнитного элемента (рис. 7.1), изменяющего свои свойства при нагреве выше точки Кюри, в результате чего в паяльнике фирмы Weller (США) происходит отключение нагревателя;

- применением массивного паяльного жала и близким расположением нагревателя.

Паяльные жала характеризуются следующими геометрическими параметрами: длиной, диаметром, формой загиба жала и формой заточки рабочего конца. Длина жала зависит от пространственного расположения паяных соединений и может быть от 10 (микропаяльники) до 300 мм (паяльники для объемного монтажа). Диаметр жала должен в 5–15 раз превышать диаметр проводника. Для паяльников установлен ряд предпочтительных диаметров: 0,5; 0,8; 1,5; 3; 5; 8; 10 мм.

Форма загиба жала выбирается в зависимости от глубины монтажа и интенсивности тепловой нагрузки, а также пространственного расположения паяемых соединений (табл.7.1, рис. 7.2).

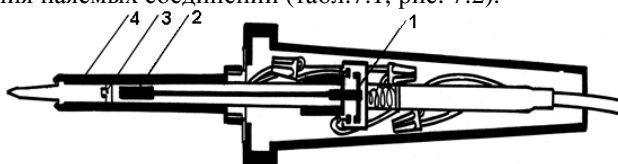


Рис. 7.1. Паяльник фирмы Weller с термостабилизацией: 1- включатель, 2- постоянный магнит, 3– датчик температуры, 4–нагреватель

Таблица 7.1

Унифицированный ряд загиба паяльных жал

Индекс жала	Угол загиба, град.	Характеристика применения		
		глубина монтажа	интенсивность нагрузки	расположение соединений
А	0	большая	любая	Разнотипное
Б	90	средняя	средняя	Однотипное
В	120	небольшая	средняя	Многообразие пространственного положения
Г	135	небольшая	высокая	

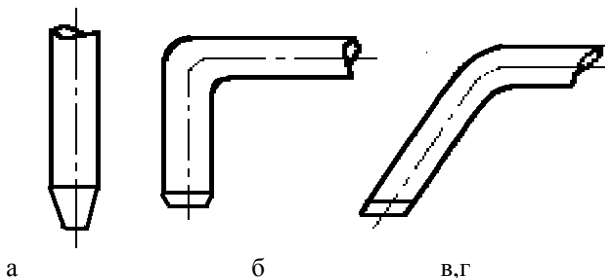


Рис. 7.2. Формы загиба паяльных жал

Форма заточки паяльного жала зависит от плотности монтажа, размеров контактных площадок, интенсивности тепловой нагрузки (рис. 7.3, табл. 7.2).

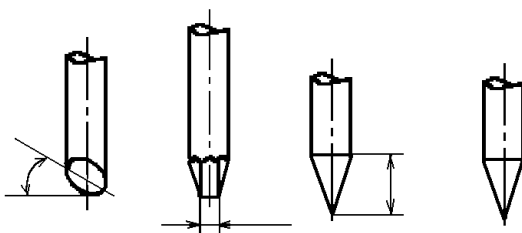


Рис. 7.3. Формы заточки унифицированного ряда паяльных жал

Таблица 7.2

Унифицированный ряд заточки паяльных жал

Номер заточки	Конфигурация жала	L, мм	Характеристика применения		
			плотность монтажа	размер контактных площадок	Интенсивно- сть тепловой нагрузки
1	Две рабочие плоскости	2	высокая	небольшой	небольшая
2	- " -	4	высокая	средний	средняя
3	- " -	6	средняя	большой	высокая
4	Одна рабочая плоскость	5	высокая	средний	средняя
5	Три рабочие плоскости	3	средняя	средний	средняя
6	Увеличенная поверхность	до 1	высокая	небольшой	средняя

При унификации паяльных жал введены следующие их обозначения из трех знаков: первый определяет диаметр жала, второй (буква) - угол загиба жала, последний (цифра) - номер заточки, например, 8Б6 и т.д.

Эрозионная стойкость жала паяльника определяет его долговечность. Обычное медное жало из-за интенсивного растворения в припое после 1000 паяк теряет форму и нуждается в заточке. Для защиты жала применяют гальваническое никелирование толщиной 90–100 мкм, что удлинит срок службы жала примерно вдвое. Перспективное решение проблемы - применение порошковых спеченных сплавов медь-вольфрам. Повышенная термо- и износостойкость вольфрама удачно сочетается с хорошей теплопроводностью меди. Гарантированная пористость материала удлиняет смачивание жала припоем.

Фирмой Weller выпущен беспроводной паяльник WC100 для ремонтно-монтажных работ, обладающий следующими характеристиками: время нагрева жала до температуры 270°C составляет 6 с; встроенная подсветка зоны пайки; время работы от кадмиевой батарейки около 10 часов; три сменных жала с диаметрами 0,8, 1,5, 2,5 мм и длиной 63 мм; удобный дизайн, обеспечивающий включение питания нажатием кнопки непосредственно перед выполнением пайки. Та же фирма выпускает устройства типа HEAT-A-DIP для распайки ИМС и ремонта электронных блоков на печатных платах, имеющие сменные насадки для ИМС с различным количеством выводов и экстракторы для демонтажа ИМС с печатных плат.

Фирма "Pace Inc." выпустила портативный прибор MP-1 для пайки и демонтажа элементов (рис. 7.4), предназначенный для ремонтных работ электронной аппаратуры в различных условиях и работающий от сети 220В или 12 В батареи. Время нагрева жала – 1 минута, обеспечивается надежный контроль температуры жала паяльника.

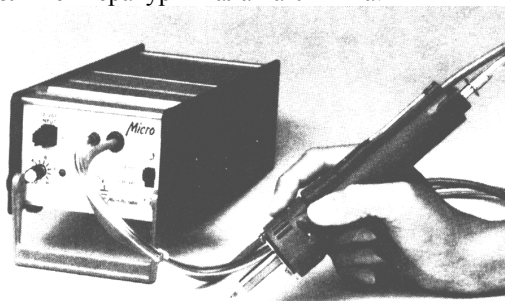


Рис. 7.4. Портативный прибор МР-1 для ремонта электронной аппаратуры

Ряд зарубежных фирм выпускает паяльные станции, состоящие из стабилизированного блока питания, паяльника с набором сменных жал и вакуумного отсоса припоя из зоны пайки, представляющего собой конструкцию типа медицинского шприца с пружиной.

В 1930 г. Карл Веллер изобрел новую концепцию паяльного инструмента – паяльный пистолет. Нагревательный элемент и паяльное жало объединены в этом инструменте и состоят из специального сформированного медного проводника, чье максимальное сопротивление сконцентрировано на наконечнике в форме клина [117]. Этот проводник подсоединяется через низковольтный вторичный трансформатор, размещенный в пластмассовом корпусе в форме пистолета (рис. 7.5). Спусковой курок включает пистолет или выключает и иногда выбирает одну из двух рабочих температур. Преимущества паяльного пистолета: быстрый нагрев и охлаждение, небольшой и маневренный наконечник, недорогой нагревательный элемент, возможность контроля температуры спусковым курком. Недостатки: большая масса и объем, значительный ток, протекающий через наконечник, необходимость работать маленьким наконечником при высокой температуре для компенсации недостатка источника тепла, наличие обширных магнитных поля, создаваемых паяльными пистолетами.



Рис. 7.5. Паяльный пистолет

Твердотельный паяльный пистолет фирмы Ungar 6760 имеет жестко заземленный изолированный наконечник для защиты чувствительных интегральных схем. Твердотельные компоненты заменяют тяжелый, генерирующий магнитные поля трансформатор, и масса паяльника

снижена до 140 г. Мгновенный выбор двух температур - 500°F или 900°F производится переключателем, отделенным от спускового курка.

Модель 450 All Gun фирмы Wen – температурно - контролируемый пистолет, который имеет три жестких сменяемых наконечника: "карандашный" наконечник с уровнем мощности 25–100 Вт для печатных плат, 100–200 Вт тепловой мощности наконечник для внутреннего монтажа приборов и 200–450 Вт тепловой мощности наконечник для паяк швов по закладным деталям припоя. Возможно прикрепление плоского наконечника для удаления заусенцев и резки пластиков. Модель GT-7A пистолета фирмы Weller также температурно–регулируемая и имеет регулятор мощности, который включается нажатием кнопки. Паяльные наконечники мощных пистолетов массой 200 г имеют специальное покрытие для гарантии более чем 30000 паяных соединений.

Фирма Weller широко представлена на рынке различными модификациями паяльных станций, начиная от недорогих типа WESD51D (рис. 7.6) мощностью 50 Вт и поддерживающих температуру паяльника в диапазоне от 240 до 750°C с точностью 5°C и до сложных паяльно–ремонтных центров с большим набором инструментов. Для ремонтных работ эта же фирма выпускает паяльники без шнура, работающие от аккумуляторов (рис. 7.7).

Для повышения безопасности процесса пайки полупроводниковых элементов и человека паяльник снабжают индикатором электрического пробоя в виде светодиода и делителя напряжения (рис. 7.8) [118].



Рис. 7.6. Паяльная станция WESD51D



Рис. 7.7. Работа с паяльником без шнура

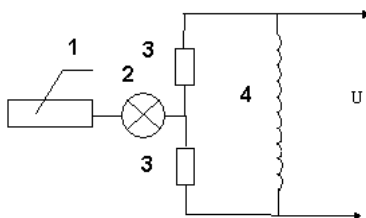


Рис. 7.8. Схема индикатора электрического пробоя: 1 – паяльное жало, 2 – индикатор, 3-резисторы, 4- нагреватель

Ряд зарубежных фирм выпускает паяльные станции, состоящие из стабилизированного блока питания, паяльника с набором сменных жал и вакуумного отсоса припоя из зоны пайки. Так фирмой Ersa разработано современное технологическое оснащение - универсальная паяльно-ремонтная станция IR500A для ручной пайки и демонтажа электронных компонентов (рис. 7.9). В ее состав входят инструменты контактного типа с микропроцессорным регулированием температуры и инфракрасные излучатели. Инфракрасная часть станции включает два излучателя: верхний и нижний. Нижний ИК излучатель (110×110мм) служит для прогрева обширной зоны печатной платы до 120–150°С с целью уменьшения перепада температур и сокращения общего времени процесса пайки или выпаивания. Верхний ИК излучатель (ИК пушка) создает зону нагрева с линейными размерами сторон от 10 до 55 мм. ИК излучение осуществляется на длинах волн 2–8 мкм, наилучших в соотношении отражаемой и поглощаемой тепловой энергии. Нижний ИК излучатель используется для ускорения любых операций контактной пайки или демонтажа и предварительного прогрева плат для исключения эффекта «воздушной кукурузы», предотвращения

возможных микротрещин керамических chip компонентов при резком нагреве в процессе контактной пайки.

Лазерный светодиодный указатель служит для подсветки точки в центре рабочей зоны, куда следует установить изделие для пайки или выпаивания. Станция IR500A выполняет операции инфракрасной пайки и выпаивания с компонентами, монтируемыми как на поверхность, так и в отверстия. Среди них: микросхемы в корпусах типа BGA, CSP, PGA, SOIC, QFP, PLCC, разнообразные разъемы, экранирующие и сложно профильные элементы. Размеры прямоугольной зоны нагрева определяются регулировкой окна верхнего ИК излучателя, а любую геометрию зоны нагрева в пределах 55×55мм можно задать с помощью специальной отражающей фольги, которой закрывают области платы, не подлежащие нагреву до оплавления припоя.

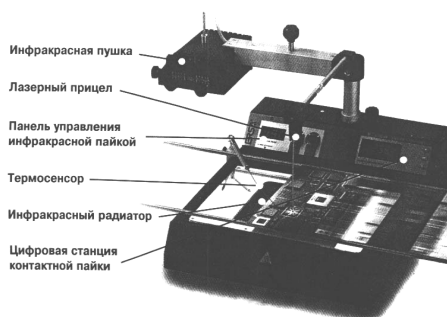


Рис. 7.9. Универсальная паяльно–ремонтная станция IR500A

Микропроцессорное управление и малоинерционные нагреватели обеспечивают максимальную термостабильность. Диапазон регулировки температуры от 50°C до 450°C. Сервисные функции: автоматическое распознавание инструмента, калибровка температуры под конкретные насадки, память 8 режимов, выбор профиля регулирования температуры ("мягкий" для особо чувствительных компонентов или "жесткий" для скоростной пайки массивных контактных соединений в изделиях).

Система ERSA IR/PL 650 представляет третье поколение ремонтных центров ИК пайки, специально разработанных для бессвинцовой технологии, сложных компонентов (размером от 1×1 до 60×60 мм) и больших размеров плат (460×560 мм) [119]. Процесс установки и удаления микросхем осуществляется в полуавтоматическом режиме, что гарантирует высокую (до 0,01 мм) точность.

Автоматизированная система контроля и поддержания температуры жала паяльника должна обеспечить погрешность измерения температуры не более 1°C , а также ее поддержание в холостом режиме (без циклов пайки) не более 3°C . Для нагревательного элемента можно использовать питание постоянного напряжения 36–110 В со средней мощностью 25 Вт на каждый паяльник или нагревательный элемент в случае для установки ИК пайки. Нагрев должен обеспечить регулируемую температуру в зоне пайки 180 – 400°C . Период снятия показаний с датчиков и отдания команды на модуль нагревания 0,5–2,0 с в зависимости от количества используемых паяльников или нагревательных элементов. Основные методы контроля и управления температурой подразделяются на следующие:

1. Применение в паяльнике термочувствительного, сопротивление которого меняется в зависимости от температуры скачкообразно или плавно. При плавном регулировании обеспечивается более точное поддержание температуры, но имеются недостатки: низкий КПД, высокий локальный нагрев управляющего элемента, низкий срок его службы, сложность перенастройки рабочей температуры.

Для управляющего элемента со скачкообразным изменением проводимости устраняются перечисленные выше недостатки, но для него характерны следующие другие: механическая и тепловая инерционность приводят к значительным нестабильностям в рабочей температуре, неточность установления средней рабочей температуры. Ее обычно выставляют методом последовательных приближений,

2. Паяльные станции с микропроцессорным контролем температуры, в которых устранены все недостатки, характерные для первого типа контроля. Для ручной монтажной пайки паяльником этот метод наиболее предпочтителен, так как он обеспечивает малые размеры блока управления, высокую точность поддержания температуры. Как правило, паяльники в данной системе имеет высокую скорость нагрева – до $10^{\circ}\text{C}/\text{с}$. К недостаткам можно отнести следующие:

- сложно применить «интеллектуальное» расширение для блока управления. Например: если в паяльнике долгое время (60–300 с) не было циклов охлаждения-нагрева то его можно отключить.
- если разность потенциалов между жалом паяльника и базовой точкой – «землей» платы превысит некоторое пороговое значение, то, во избежание выхода ИМС, особо критичных к статическому напряжению, необходимо подавать предупреждающие звуковые сигналы. При невозможности устранить потенциальную угрозу статического пробоя, должна быть предусмотрена возможность

автоматического отключения паяльника от сети и включения по окончании процесса для набора теплоты.

3. Паяльные станции с компьютерным контролем температуры, для которых управляющая программа может быть с очень развитыми возможностями, учитывающими все основные параметры процесса, имеющей блок прогнозирования температуры на основе предыдущих показаний датчиков. Недостатки таких станций: дороговизна и большее занимаемое место. Разрешить данные недостатки можно путем подключения к одному компьютеру нескольких паяльников (до 16). Для реализации этого необходимо, чтобы в согласующем устройстве был дешифратор для выбора, с каким паяльником или нагревательным элементом будет происходить обмен информации.

Обмен должен быть двунаправленным – датчик от каждого паяльника сообщает компьютеру о своей температуре, а компьютер должен на основании расчетов определить, в каком состоянии находится паяльник: нагреваемом или нет. Соответственно, чем больше контролируемых нагревательных элементов, тем больше будет цикл последовательного опроса каждого датчика. Так как паяльники со встроенными управляющими элементами не способны изменять свое состояние быстрее чем за 5–10 с, то для обеспечения нашей требуемой точности и стабильности поддержания температуры опрос проводится не реже чем каждые 2 с. (рис. 7.10). Для преобразования температуры в числовой код используют специализированную микросхему, которая создает последовательность импульсов с частотой пропорциональной входному напряжению.

Методика измерения температуры состоит в том, что компьютер подсчитывает количество импульсов, пришедших на параллельный порт LPT1 за время между двумя соседними импульсами внутреннего генератор [120], стабилизированного от кварцевого резонатора. Подходящим средством является прерывание INT 8, которое каждые 55 мс (18 Гц) увеличивает на единицу 32 разрядный счетчик по фиксированному адресу.

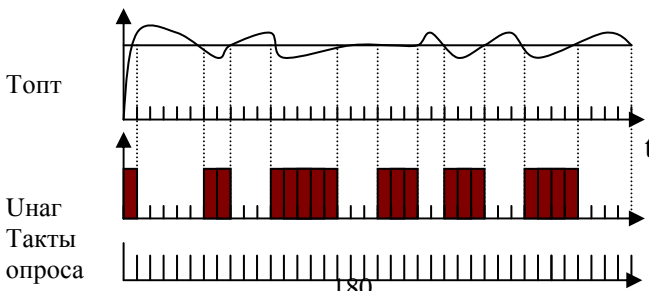


Рис. 7.10. Временная диаграмма

Таким образом, можно 9 раз в секунду производить опрос датчиков. Вычислительную мощность компьютера выбирают такой, чтобы длительность времени ожидания прихода следующего импульса была 20–30 мс. При малой длительности времени ожидания длительность периода считывания показаний с датчика может увеличиться с 110 мс до 220 мс, что ухудшит параметры паяльной станции. При слишком большой величине времени ожидания неэффективно использование процессорных ресурсов компьютера. Так как связь с каждым нагревательным элементом составляет 1/8 или 1/16 от всего времени работы, то необходимо оснастить блок управления каждым нагревательным элементом памятью, которая будет хранить состояние его состояние в течении 7/8 от периода, что позволит при требуемой средней мощности на нагревателе пропускать через него ток в 8 раз меньше. Спряжение осуществляют по схеме, приведенной на рис. 7.11.

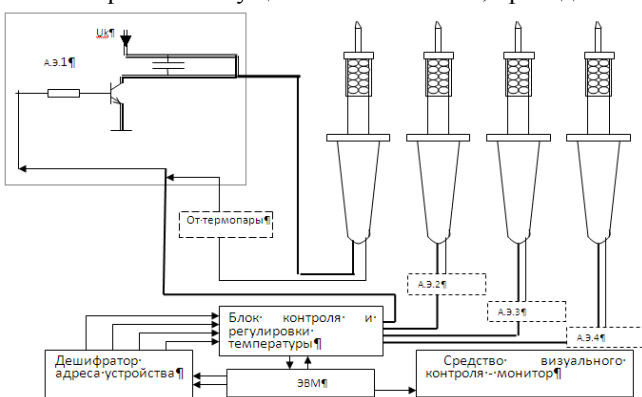


Рис. 7.11. Схема устройства контроля и управления температурой паяльных станций

Рассеиваемая мощность на транзисторе при рабочем напряжении 36 В и средней мощности паяльника 15–25 Вт составляет 0,5–1,0 Вт, что не требует использования больших размеров радиаторов. Паяльные станции серии Advanced фирмы JVC позволяют поддерживать на любом типе паяльного жала температуру с высокой точностью с помощью микропроцессора, снимающего показания температуры со скоростью 100 измерений в секунду [121]. Инерционность системы

нагрева сведена к минимуму, так как масса сменного нагревателя, встроенного в картридж, содержащий наконечник и термопару, очень мала. Поэтому в данной станции обеспечивается поддержание температуры именно на рабочем конце паяльного жала, в отличие от других систем.

7.2. Пайка элементов в отверстия печатных плат

При пайке погружением плата модуля опускается в расплавленный припой, который является источником нагрева. Так как переход тепла от жидкого припоя большой массы (50 кг и более) к контактным площадкам и выводам компонентов происходит достаточно быстро, то температура пайки достигается в течение 1–2 с. В зависимости от характера движения платы по поверхности припоя различают следующие способы пайки погружением в расплав припоя: вертикальным или наклонным перемещением платы, колебательным движением платы, протягиванием платы по поверхности припоя, избирательной подачей припоя. Погружение платы в припой с вертикальным перемещением осуществляют на глубину, не привыкшую её толщину. Технологические параметры: температуру расплава припоя в интервале 260 – 280°C поддерживают с точностью $\pm 5^\circ\text{C}$ и время погружения в пределах 4 – 6 с. Поверхность припоя при пайке должна быть чистой от окислов, которые удаляются скребком перед каждым погружением платы. При вертикальном погружении и извлечении платы наблюдается ряд недостатков, которые связаны с условиями удаления жидких и газообразных остатков флюса и излишков припоя. Затрудненность выхода остатков флюса на поверхность припоя может привести к "захвату" флюса припоя и образованию ложных паек. Припой не успевает стекать с платы и образует сосульки, короткозамыкающие мостики.

Недостатками процесса : низкая производительность, что определяет его пригодность для мелкосерийного производства; невысокое качество паяных соединений, значительный процент дефектных соединений; повышенный расход припоя; значительное термическое воздействие на плату. Ряд этих недостатков устраняется при наклонном погружении и извлечении платы. При погружении под углом 5-7 обеспечивается удаление газовых фракций флюса и продуктов реакции, а также стекание припоя с паяемой поверхности платы.

Удачным сочетанием способа с наклонным погружением платы и устройства для снятия окисных пленок является способ пайки в лотке

(рис.7.12, а). Припой находится в неподвижной ванне 1, а плата 2 с установленными компонентами, укладывается наклонно в держатель 3 лотка 4. Лоток в поперечном сечении имеет форму треугольника с вершиной угла, направленной глубь ванны. При опускании лотка в расплав припоя треугольное днище рассекает пленку окислов на поверхности припоя и своим приемным отверстием 5 начинает забирать припой из глубины ванны. При этом создаются условия для постепенного удаления из зоны пайки жидких и газообразных остатков флюса, подачи в зону пайки чистого припоя [63].

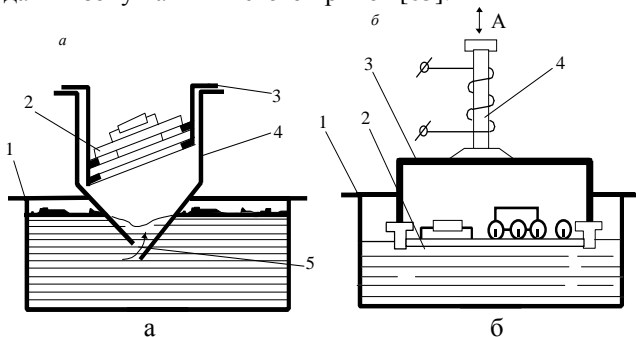


Рис. 7.12. Способы пайки в лотке (а) и с вибрациями (б)

Повышения качества паяных соединений в платах с металлизированными отверстиями достигают применением колебательных движений платы, закрепленной в держателе (рис. 7.12,б). На плату подают механические колебания частотой 50–300 Гц и амплитудой 0,5–2,0 мм, получаемые от электромагнитного вибратора, либо ультразвуковые колебания частотой 20–44 кГц и амплитудой 10–20 мкм. Механические вибрации способствуют проникновению припоя в металлизированные отверстия, удалению остатков флюса, улучшают структуру припоя в соединении. Ультразвуковые колебания вызывают разрушение окисных пленок и улучшают смачивание припоем. Недостатки: необходимость надежного фиксирования компонентов на плате; возможность возникновения механических резонансов в компонентах, особенно транзисторах, что приведет к их повреждению.

При пайке протягиванием (**Drag Soldering**) по поверхности припоя плату укладывают в держатель, который под углом 5–10° опускается на поверхность припоя и протягивается определенное расстояние по зеркалу припоя. Впереди держателя имеется скребок, который очищает поверхность зеркала от окислов припоя. При подъеме платы излишки

припоя стекают в ванну. Поскольку спокойная ванна припоя имеет меньшую склонность к окислению, то состав и чистота припоя поддерживаются с хорошим постоянством. Скорость протягивания составляет 5–8 м/мин, время для одной платы - до 10 с. Установки пайки легко встраиваются в обычный сборочный конвейер. Недостатки – относительно большое время пайки и связанное с этим значительное тепловое воздействие на поверхность платы. Эти недостатки устраняют применением защитных масок на паяемую поверхность платы.

Для избежание коробления плат при пайке погружением термочувствительных элементов применяют избирательную пайку, которая заключается в подаче припоя только в места пайки. Ванна с припоем закрыта кондуктором, в котором имеются отверстия, точно соответствующие числу и расположению зон пайки. Подача припоя осуществляется с помощью поршня, который выдавливает его через отверстия кондуктора в места пайки. Недостаток – трудность перестройки на другой типоразмер плат.

Пайка волной (**Wave Soldering**), впервые предложенная в 1955 г. компанией Philips, в настоящее время является самым распространенным в промышленности способом пайки печатных плат для крупносерийного и массового производства электронных модулей. Специфические преимущества этого процесса заключаются в высокой производительности механизированного движения плат относительно припоя; возможности создания автоматизированных установок, выполняющих полный комплекс операций: обезжиривание, флюсование, подогрев, пайку, отмычку от флюса и сушку; взаимодействии платы с чистой поверхностью припоя в короткий промежуток времени, что снижает термоудар, коробление диэлектрика, перегрев элементов. Недостатки: большая масса припоя в ванне (100–500 кг), значительные габариты оборудования (несколько метров), большее окисление припоя по сравнению с погружением.

Технологические основы метода пайки водной вытекают из характера взаимодействия потока припоя с платой. Главным условием высокой разрешающей способности пайки волной припоя, позволяющей без перемычек, мостиков и сосулек припоя паять платы с малыми зазорами между печатными проводниками является создание тонкого и равномерного слоя припоя на проводниках платы, что в свою очередь формирует паяные соединения "скелетной формы".

Процесс пайки состоит из трех этапов: входение в припой (точка А), контактирование с припоем (отрезок АВ) и выход из припоя (точка В) (рис.7.13). На первом этапе направление фонтанирования волны V_A

способствует удалению паров флюса из зоны контакта, как при двусторонней, так и при односторонней волне. На втором этапе полоса растекания припоя по плате АВ в сочетании со скоростью конвейера V_K определяет время пайки. При двусторонней волне это время больше, что обеспечивает более полное заполнение припоем металлизированных отверстий. Увеличение времени контакта повышает толщину припоя на печатных проводниках до некоторого предела. Окончательная толщина слоя формируется на выходе платы из волны в точке В. В односторонней волне продольная составляющая скорости фонтанирования V_B вычитается из скорости конвейера, смывает излишки припоя и утончает оставшийся слой припоя. Более благоприятны горизонтальное положение конвейера, пологая форма и возможно большая скорость циркуляции припоя. Глубина погружения составляет 0,6–0,8 от толщины платы, но может достигать 1,5–2,0 толщины с носовым козырьком в передней части кассеты. В двусторонней волне скорость V_B складывается со скоростью конвейера V_K и способствует образованию наплывов, поэтому увеличивают угол наклона, крутизну волны и уменьшают скорость фонтанирования [8].

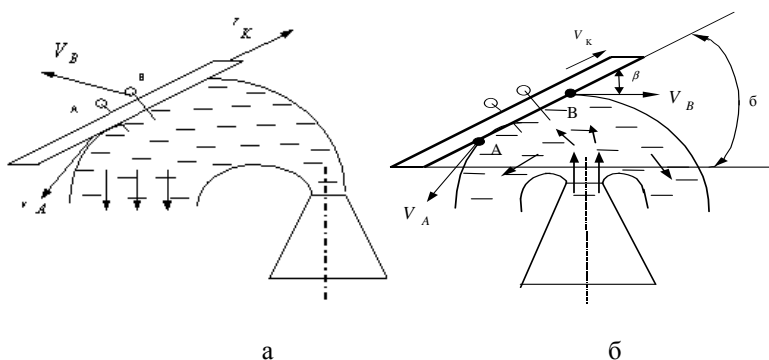


Рис. 7.13. Схемы взаимодействия односторонней (а) и двусторонней (б) волны с платой

Односторонняя волна применялась в более ранних установках со скоростью конвейера 0,5–1,5 м/мин. Двусторонняя волна используется в линиях пайки ЛПМ-500 и TDF фирмы Hollis (США), имеющих скорость конвейера до 2,5 м/мин, пенный флюсователь, подсушку флюса. Наряду с двусторонней параболической волной применяют другие профили волн (рис. 7.14): плоскую или широкую (а), вторичную или "отраженную" (б), дельта – волну (в), лямбда – волну (г), омега - волну.

Плоская или широкая волна имеет протяженность до 70–90 мм, что значительно увеличивает площадь контакта между платой и припоем. Это дает возможность значительно увеличить производительность процесса пайки, например, скорость движения платы до 3 м/мин в установке ASTRA фирмы Hollis. Подобная конфигурация волны позволяет получать качественные паяные соединения при меньшей температуре припоя, чем при пайке волной параболической формы. К недостаткам данной волны относится увеличенная открытая поверхность расплава, способствующая образованию окисных пленок в припое. Вторичная волна образуется за счет наклонного отражателя с одной стороны сопла, что обеспечивает удержание определенного количества припоя в виде волны меньшей высоты. Температура во вторичной волне меньше, чем в основной. За счет взаимодействия платы с вторичной волной происходит оплавление сосулек припоя и повторная пайка соединений.

Дельта - волна характеризуется стоком припоя в одну сторону, для чего одна стенка сопла выполнена удлиненной, а также большим напором припоя, что обеспечивает более глубокую волну. Применяется для пайки элементов с удлиненными выводами, например, разъемов. Недостаток - большая чувствительность высоты волны от степени нагнетания припоя в сопловой насадке.

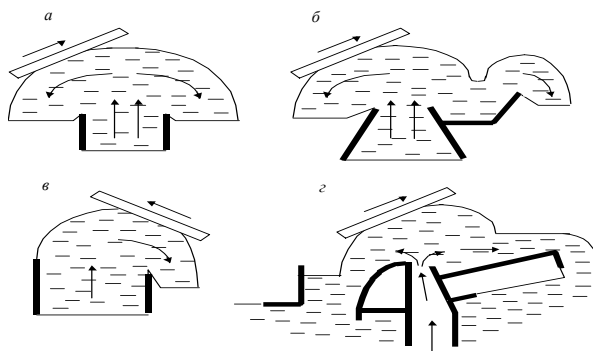


Рис. 7.14. Профили волн для групповой пайки

Лямбда – волна, предложенная фирмой Electrovert (Канада), использует насадку сложной формы и имеет передний со стороны платы крутой слив припоя и длинный практический горизонтальный профиль волны на выходе платы. На входе платы в волну формируется ускоренный поток припоя, обладающий хорошим смачивающим действием и проникающей способностью в отверстия. На выходе

устанавливается практически нулевая относительная скорость платы припоя, а постепенное увеличение угла между платой и поверхностью припоя устраняет образование наплывов и сосулек. Такой профиль волны с высотой от 13 до 19 мм позволяет вести качественную пайку многослойных плат с плотным монтажом на установке WSV фирмы Electrovert при скорости конвейера до 5,4 м/мин.

На базе лямбда - волны фирмой Electrovert создана вибрирующая омега - волна за счет размещения вибрирующего элемента в окне сопла, через которое подается припой. Вибрация элемента создается с помощью электромагнитного вибратора, работающего на частоте 60 Гц с изменяемой амплитудой колебаний 1–3 мм. Оптимальные параметры пайки: скорость конвейера 1,2 м/мин, температура припоя в ванне 250°C, амплитуда вибраций 1,0–1,3 мм. За счет придания турбулентности волне припоя обеспечивается заполнение металлизированных отверстий в платах на уровне 99%, количество дефектов в виде непропаев сокращается в два раза. Омега - волна используется в установке Century 2000 фирмы Electrovert, имеющей скорость конвейера до 6 м/мин [122].

Установки волновой пайки оснащаются устройствами, обеспечивающими плавное регулирование скорости движения транспортера от 0,3 до 3,0 м/мин; прекращение пенообразования флюса при выключении двигателя транспортера; автоматическую остановку платы над ИК нагревателем для лучшего подогрева плат толщиной более 1,5 мм; подачу защитной жидкости на волну припоя.

На линии SOLTEX (Голландия) осуществляют двухступенчатую пайку по схеме: пенное флюсование—подогрев—пайка протягиванием по поверхности припоя—охлаждение—обрезка выводов фрезой с подзаточкой и пневматическим реверсом—очистка щетками—флюсование—подогрев— пайка волной припоя, что сокращает расход припоя, обеспечивает однородность паяных соединений с заданной высотой выводов над поверхностью платы.

Дальнейшая микроминиатюризация привела к увеличению плотности компоновки, размеры проводников на плате уменьшились до 0,25 мм, а зазоры — до 0,125 мм, число выводов на компонент возросло до 200. Остающийся на плате избыток припоя вызывает образование соединений заливной формы, которые менее надежны, чем соединения видимого контура, способствует возникновению перемычек, коротких замыканий элементов и проводников, а также сосулек припоя.

Примером нового подхода к технологии пайки волной припоя является концепция воздушного ножа, предложенная фирмой Hollis

Engineering (США) (рис. 7.15). Поток горячего воздуха, направленный на плату 1 удаляет с нее излишки припоя, перемычки и сосульки. Конструктивно сопло 2 изготавливается из нержавеющей стали, встроенные нагреватели внутри сопла обеспечивают нагрев воздуха до температуры 375–390°С при давлении 0,3 МПа. Горячий воздух направляют на паяемую сторону платы через 6–8 с после ее выхода из волны под углом 40–42° и на расстоянии до 20 мм от поверхности платы. Поскольку нагрев воздуха сопровождается значительными затратами электроэнергии, то установки оборудуют автоматической системой, включающей подачу воздуха при выходе платы из волны [123].

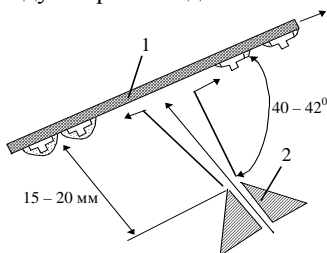


Рис. 7.15. Схема воздушного ножа

Воздушный нож используется в установках GBS Mark 3 и SPS фирмы Hollis, оборудованных модулем двойной волны припоя, предварительным ИК - подогревом плат с 2-х сторон и максимальной скоростью конвейера – до 3,6 м/мин.

Сокращение брака и обеспечение высокого процента выхода годных модулей (до 95% и выше) достигается компьютеризацией процесса волновой пайки. Компьютер не только позволяет улучшить качество соединений, но и увеличить в 10 и более раз скорость контроля. Для компьютерного управления необходимо для каждого электронного модуля сформировать матрицу параметров, таких, как тип печатной платы, длина выводов элементов, скорость и ширина конвейера, температура подогрева платы, плотность флюса, температура пайки и другие. Микропроцессорными системами управления оснащены установки SPS фирмы Hollis, Gemini 400 FH фирмы Sensbey (Япония), NFS 300 фирмы Zevatron (Германия), которые обеспечивают рекомендуемый температурный профиль волной пайки

Установки серии ETS330 фирмы Ersa имеют модульную конструкцию (рис. 7.16), что позволяет их конфигурировать в соответствии с требованиями серийного производства. Дополнительная

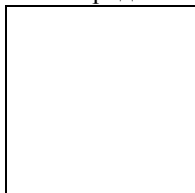
турбулентная волна обеспечивает качественную пайку SMD.



Рис. 7.16. Установка пайки волной ETS330

Установки имеют пальчиковую конвейерную систему с максимальной шириной 330–500 мм, пенный флюсователь или флюсователь распылением с гибкой системой управления и возможностью пайки в инертной среде. Наличие в микропроцессорной системе управления семидневного таймера позволяет оптимизировать время работы установки. Дополнительное подключение к персональному компьютеру увеличивает число рабочих программ и дает визуальное представление о текущих процессах.

Волну припоя в установках пайки образуют механическим и электромагнитным нагнетателями. Механический нагнетатель (рис. 7.17) содержит замкнутую полость в ванне 1, на выходе которой установлено сопло 2, в которую нагнетают расплавленный припой крыльчаткой, расположенной на валу 5, связанном ременной передачей с электродвигателем. Плата 4 входит в волну припоя 3 под углом



Высота гребня волны регулируется изменением числа оборотов электродвигателя постоянного тока с помощью вариатора. Такая конструкция проста, однако, требует наличия дополнительных блокировок от включения двигателя при нерасплавленном припое.

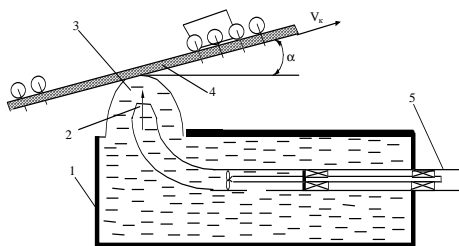


Рис. 7.17. Схема механического нагнетателя

В электромагнитных нагнетателях взаимодействие электрического тока в расплаве и внешнего магнитного поля приводит к появлению пондеромоторных сил, направленных перпендикулярно векторам тока и поля и приводящих расплав в движение. Электромагнитный нагнетатель (рис.7.18) содержит Ш - образный магнитопровод 1, между крайними стержнями 2 и 3 которого размещена ванна 4, заполненная припоем.

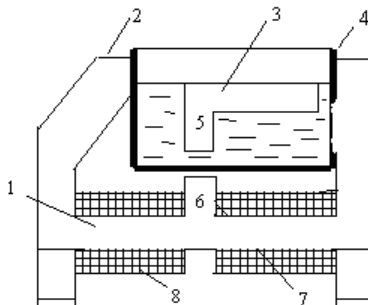


Рис. 7.18. Схема индукционного насоса

Средний, более короткий стержень 5, примыкает к дну ванны. Один из крайних стержней, например, 3, соединен со средним стержнем, замыкающим магнитопровод 6, который омывается со всех сторон припоем и образует вторичный короткозамкнутый виток. Нагнетатель имеет обмотки индукционного нагрева 7 и нагнетания 8. При питании переменным током обмоток в зазоре между стержнями 3 и 6 образуется переменное магнитное поле, а во вторичном жидкометаллическом витке индуцируется ток. В результате их взаимодействия припой выбрасывается наверх. Для получения максимальной силы выброса

припоя фазу напряжения питания обмотки 8 выбирают такой, чтобы магнитный поток в рабочем зазоре совпадал по фазе с индуцируемым током в расплаве припоя.

Электромагнитные нагнетатели в установках GTF/160 и GTF/330 фирмы KIRSTEN (Германия) (рис.7.19) создают динамическую Jet – волну высотой 5–25 мм при скорости конвейера до 3 м/мин. Преимущества электромагнитных нагнетателей: в зоне нагнетания припой дополнительно нагревается индуцированными в нем электрическими токами; электромагнитные силы перемещают расплав только непосредственно в рабочем канале, что уменьшает окисление припоя; отсутствуют движущиеся детали в припое; высота и температура струи легко регулируются.

Для пайки в среде азота фирмой SEHO (Германия) (табл. 7.3) выпущена установка пайки волной MWS 2340, которая имеет 6 зон предварительного подогрева общей длиной 1800 мм, реализованных с помощью ИК модулей мощностью 3 кВт, двойной модуль пайки, систему подачи инертного газа и микропроцессорный блок управления (рис. 7.20). Предназначена для пайки поверхностно монтируемых компонентов бессвинцовыми припоями.

Таблица 7.3

Оборудование для пайки волной припоя

Фирма	Модель	Тип	Макс. шири, мм	Волна припоя	Тип транспортера	Флюсование	Предварительный нагрев	Атмосфера
ERSA	ETS 330	НС	330 (500)	ВП, ДВП	ПЛ	Р, П	ИК	КК
ERSA	N-Wave	НП	500	ДВП, ВВ	ПЛ, Л	Р	ПВ, ИК	ИА, КК
Electrovert	Astrapak	НП	400	ДВ, ВВ	Л	Р, П	ПВ, ИК	ИА
Speedline	EPK Plus	НП	400	ДВП, ВВ	Л	Р, П	ПВ, ИК	ИА, КК
Soldematic	96-1200	НП	305	ВП	ПЛ	П	ПВ	
SEHO	MWS824	НП	400	ДВП, ВВ	ПЛ,Л	Р, П	ИК	ИА, КК
SEHO	MWS 2340	НП	400 (500)	ДВП	ПЛ	Р	ИК-6 зон	ИА, КК
SEHO	1025	НС	240	ДВП, ВВ	ПЛ,Л	П	ИК	КК
Streckfuss	E022	НС	250	ЗДВП	ПЛ	П	ИК	–
Technical	Nu/Era	НП	406	ДВП,	ПЛ,	Р, П, В	ПВ, ИК	–

Devices	Junior 16			ВВ	Л,			
ВЗРО Россия	УПВ-903Б	НП	300	ВП	ПЛ	П	ПВ	–

Условные обозначения: настольная (НС), напольная (НП) установки; волна припоя (ВП), двойная волна припоя (ДВП), (ВВ) высокая волна; пластинчатый (ПЛ), ленточный (Л) конвейер; (Р) распыление флюса; (П) пенное флюсование, (В) волна флюса; подогрев воздушный (ПВ), инфракрасный (ИК); (КК) компьютерный контроль, (ИА) инертная атмосфера.

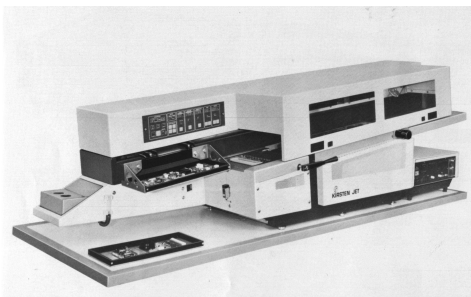


Рис. 7.19. Настольная установка пайки фирмы KIRSTEN

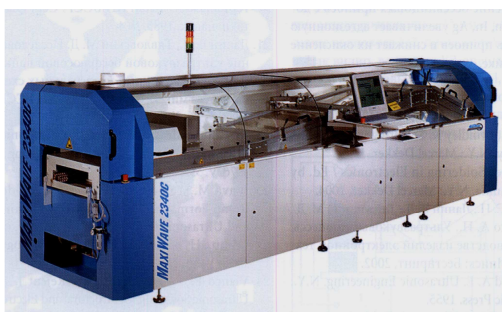


Рис. 7.20. Установка волновой пайки в защитной среде MSW 2340

7.3. Пайка элементов с планарными выводами

Для присоединения планарных выводов компонентов используют устройства с точечным или ленточным нагретым рабочим электродом

(рис. 7.21). Одноточечный нагрев применяется в операциях сборки для корпусов типа SO или корпусов с четырехрядными выводами. Диаметр наконечника из молибдена в области контакта 0,1 мм. Для создания соединений используется припойная паста или гальванически осажденный припой на поверхность платы толщиной 15–30 мкм.

Двухступенчатая пайка применяется для корпусов с четырехсторонним расположением выводов при поверхностном монтаже. Нагрев осуществляется непрерывно при помощи коротких импульсов длительностью до 2 с, поэтому температура распределяется по всей длине нагретого элемента равномерно (рис. 7.22).

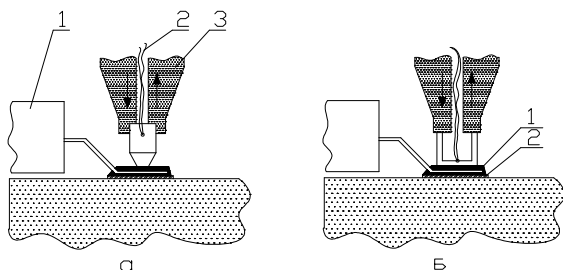


Рис. 7.21. Устройства для последовательной пайки компонентов точечным (а) и ленточным (б) электродами: 1 – компонент, 2 – термопара, 3 – электрод

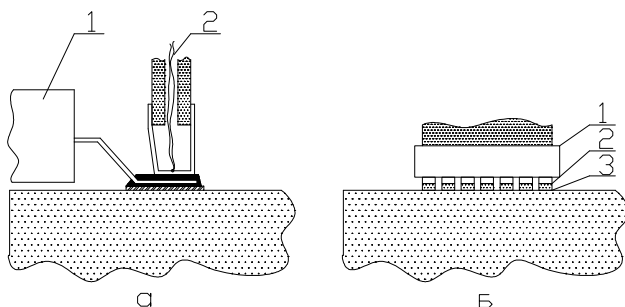


Рис. 7.22. Двухступенчатая пайка: а – вид с торца, где 1 – компонент, 2 – термопара; б – вид сбоку, где 1 – электрод нагрева, 2 – припой, 3 – припой на контактной площадке

Интегральные микросхемы в корпусах типа 4 (401.14-, 402.16-, 405.-24, 429-42 и другие), резисторные, конденсаторные сборки типов Б18, Б19 в зарубежном корпусе Flat Pack имеют планарные коваровые

позолоченные выводы с шагом 1,25 мм с перспективой уменьшения шага до 1 мм. При сборке на печатные платы ИМС из этажерочных кассет, в которых они поступают на сборку, с помощью манипулятора с вакуумным захватом устанавливаются на поверхность платы. Перед установкой на плату с помощью дозатора наносится клей. По программе палета (держатель) с платой из накопителя подается в рабочую зону, сборочная головка с помощью вакуумного захвата извлекает ИМС из кассеты, устанавливает ее на плату и производит пайку выводов.

Механизированную пайку планарных выводов ИМС ведут несколькими способами:

- миниатюрными паяльниками, закрепленными в паяльной головке;
- групповыми паяльниками с подачей тока поперек и вдоль выводов;
- параллельными электродами;
- лазерным излучением.

Способ механизированной пайки миниатюрными паяльниками реализован в автомате дозированной пайки АДПМ-1, входящим в технологическую линию «ПАЛМИС». Автомат АДПМ-1 имеет одну паяльную головку с 2-мя паяльниками, которые могут подниматься и опускаться вместе и порознь, что позволяет вести одним паяльником пайку ИМС в различных корпусах (рис. 7.23).

Механизм подачи припоя на паяльник - электромагнитный. Проволочный припой диаметром 0,5 мм наматывается на катушку и по командам от стойки ЧПУ или пульта ручного управления электромагнит включается и подает нужное количество припоя. Величина единичной дозы 0,6 мг. Подавая на электромагнит 1–6 импульсов, величину дозы можно изменять в пределах 0,6– 3,6 мг [53].

Паяльная головка обеспечивает вертикальное перемещение паяльников в пределах до 35 мм, раздвижку на 9–70 мм, прижим паяльника к паяемым выводам в пределах 1–4 Н. Время пайки в пределах 0,75–2,75 с задается программой с дискретностью 0,25 с. Контроль и поддержание заданной температуры паяльников осуществляется автоматически электронными потенциометрами с помощью терморпар типа X-K.

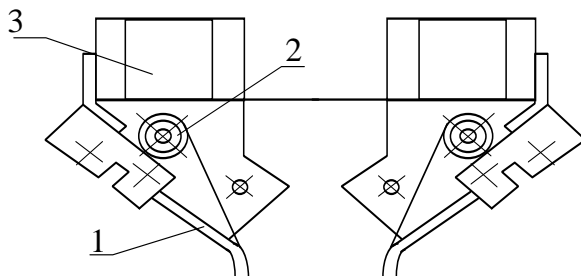


Рис. 7.23. Паяльная головка в установке пайке АДПМ-1:
1 - микропаяльник, 2 - припой, 3 - паяльная головка

Координатный стол перемещается шаговыми двигателями по осям X, Y со скоростью 0,7 м/мин и погрешностью не более $\pm 0,04$ мм. Стойка ЧПУ работает от 8-дорожечной перфоленты и обеспечивает подачу координатного стола на шаг 1,25 мм.

Дальнейшим развитием оборудования дозированной пайки стал автомат АСМ-1, имеющий магазин барабанного типа для хранения 30 прямоточных кассет, содержащих по 30 ИМС, универсальные автоматы для пайки 4-х типов ИМС с планарными выводами типов УАП-1, УАП-2 для технологической линии "ПРОГРЕСС".

Универсальный автомат с микропроцессорным управлением УСПА-1 обеспечивает нанесение дозы припоя, установку ИМС, пайку выводов. Автомат имеет более совершенную механическую систему с дискретностью 0,01 мм. Погрешность установки ИМС - $\pm 0,2$ мм. Стойка ПУ выполнена на базе микроЭВМ «Электроника - 60».

Недостатком способа механизированной пайки паяльниками является низкая производительность: АДПМ-1 - 800, АСМ-1 - 1200 и УАП-1 до 1650 пак/час. Пайка групповым паяльником позволяет повысить производительность процесса пайки до 250-300 соедин/мин (1800 пак/час) и получить соединения, не отличающиеся по внешнему виду и свойствам от соединений, паяемых вручную. Способ реализован в установках пайки типов АПМ-1, ППМ-3, УГП-902.

Высокое качество достигается при одновременной пайке 1-8 выводов одним паяльником (рис. 7.24, а), увеличение числа выводов до 12-20 приводит к снижению качества паяных соединений ввиду разброса толщины выводов. При числе выводов более 12 разность потенциалов между крайними выводами превышает 5 В, что может привести к выходу из строя ИМС. Поэтому импульсные групповые

паяльники, в которых потенциал прикладывается поперек рабочего торца паяльника и не превышает доли вольта, более предпочтительны (рис. 7.24, б).

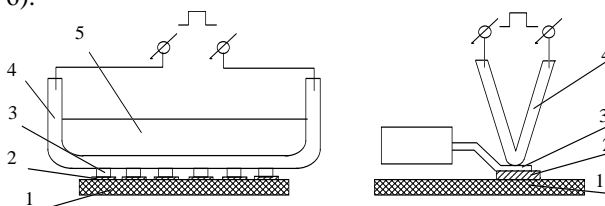


Рис. 7.24. Групповая пайка выводов ИМС групповым паяльником с подачей тока поперек выводов (а) и вдоль (б): 1 - плата, 2 - контактная площадка, 3 - вывод ИМС, 4 - паяльник, 5 - корпус ИМС

Дальнейшим развитием установок пайки групповым паяльником стали автоматы АРПМ и АУПМ-007, которые имеют поворотный магазин с 30-ю этажерочными кассетами, механизмы выдачи ИМС из кассеты на приемный столик и ориентации по ключу манипулятором с вакуумным захватом, паяльники косвенного нагрева. Автомат АРПМ имеет программное управление с перфоленты и производительность 300 шт/ч, АУПМ-007 - микропроцессорную систему управления, производительность- до 400 шт/ч.

Способ групповой импульсной пайки предложен в 60-х годах фирмой "Weltek" (США). В СССР в 80-х годах выпущен автомат сборки и пайки импульсными паяльниками модели АС-901, который выполнял операции выбора ИМС в корпусах 401.14-3,4, установки их на платы с приклейкой, групповой пайки с производительностью до 800 шт/ч.

Автомат АСП-902П построен по модульному принципу (рис.7.25). Манипуляционной основой автомата является модуль МАРС-901, имеющий линейный шаговый развернутый двигатель с платформой, которая перемещается по координатам X и Y над плитой стола. На платформе закреплены рабочая постановочно-паяльная головка с устройством автоматической смены схватов и устройством нанесения клея на плите стола, магазин сменных схватов, вибрационные питатели для установки кассет с микросхемами. Клей наносится 2-мя методами: на печатную плату дозатором, на дно микросхемы с помощью ванночек с клеем. Метод пайки выводов микросхем - импульсный. Система управления от микроЭВМ.

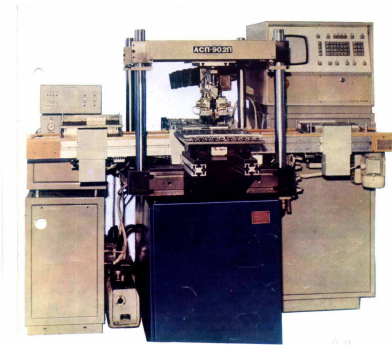


Рис. 7.25. Автомат сборки плат АСП-902П

Припой под пайку импульсными паяльниками дозируют путем нанесения на плату гальванического сплава ПОС61 толщиной 12–15 мкм и последующего оплавления либо слоя припоя в пределах до 100 мкм волной припоя. Время пайки обычно задают в интервале 0,1–0,4 с. Недостатком является отличие формы паяных соединений от пайки ручным паяльником, т.к. на соединениях остается отпечаток торца импульсного паяльника.

7.4. Методы пайки поверхностного монтажа

Технологию пайки в паровой фазе (конденсационную пайку) предложила в 1973 г. фирма Du Pont (США), после того как были запатентованы специальные рабочие жидкости. Преимуществами данного метода является равномерный нагрев электронной сборки до постоянной во времени температуры пайки в анаэробной инертной среде с применением слабоактивированных флюсов, что позволяет получить однородные паяные соединения и исключить образование перемычек припоя на плате.

Необходимые для пайки припой и флюс наносят на плату в форме припойной пасты перед ее погружением в пар. По мере погружения платы в зону насыщенного пара над кипящей рабочей жидкостью пар конденсируется на всей ее поверхности, быстро и равномерно нагревая его до температуры пайки. При этом припойная паста расплавляется и образует галтель между выводом компонента и контактной площадкой платы. Когда температура платы достигнет рабочей температуры жидкости, процесс конденсации прекращается, тем самым заканчивается и нагрев платы.

Повышение температуры платы до температуры расплавления припоя осуществляется в короткий промежуток времени (до 10 с) и не поддается регулированию. Для уменьшения термических напряжений в компонентах вводят предварительный подогрев платы.

Значительное влияние на качество пайки оказывает температурно-временной профиль процесса. Методы оплавления припоя (в парогазовой фазе, ИК-нагрев и обдувом нагретым воздухом) обеспечивают различные температурно-временные диаграммы нагрева. Поэтому температурно-временной профиль процесса пайки (рис.7.26) должен быть обоснованно определен (исходя из конструктивных особенностей SMD, применяемых материалов и др.) до выбора метода и оборудования для пайки.

Как видно из приведенной зависимости процесс оплавления припоя можно разделить на три стадии: предварительный нагрев, оплавление, охлаждение. Предварительный нагрев до 120–130°C платы и компонентов вызывает испарение растворителя из припойной пасты, удаление окисных пленок за счет действия флюса и расплавление частиц припойной пасты. Стадия оплавления припоя протекает при температуре, на 25–40°C в течение 20–60 с превышающей температуру



Рис.7.26. Температурно-временной профиль процесса пайки в парогазовой фазе

плавления применяемого сплава, что снижает силы поверхностного натяжения припоя, увеличивает смачиваемость соединяемых поверхностей. Длительность и температурный профиль охлаждения со

скоростью 1–2°С/с также оказывает влияние на свойства паяного соединения, в частности на этой фазе формируется мелкозернистая структура сплава и уровень остаточных напряжений.

При выборе температурно-временного профиля необходимо учитывать также и допустимые температуры нагрева компонентов, особенно активных. Большинство таких компонентов могут подвергаться без разрушений воздействию температур 210–220°С в течение 20–60 с. Критичны в высокоскоростным тепловым воздействиям конденсаторы, в которых тепловой удар может вызвать появление трещин и отслоению металлизации. Рекомендуемая скорость изменения температуры при пайке конденсаторов составляет не более 2°С/с. Высокоскоростной нагрев может вызвать и разрушение корпусов ИМС, в частности, из-за расширения и выделения, содержащейся в материале влаги. Для предотвращения этого явления применяется тщательная предварительная очистка и сушка корпусов.

Одной из важных особенностей этого процесса является независимость режимов нагрева от геометрической формы и размеров плат. К другим достоинствам этого метода можно отнести:

- температура определяется и контролируется самим процессом и является наиболее низкой из применяемых методов оплавления;
- рабочая жидкость испаряется с поверхности печатной платы, не оставляя на ней следов;
- процесс пайки химически чистый так как элементы взаимодействуют с дистиллированной рабочей жидкостью;
- рабочая жидкость и ее пары не вызывают повреждения электронных компонентов;
- рабочие жидкости имеют низкую растворяющую способность, что обеспечивает ее совместимость практически со всеми используемыми материалами;
- минимальное окисление паяных соединений при монтаже.

Метод пайки в ПГФ является в настоящее время одним из основных в технологии ПМ. Он основан на конденсации насыщенного пара рабочей жидкости на поверхности сборочной единицы после ее входа в рабочую зону. При этом происходит одновременный нагрев всех элементов сборки до температуры, соответствующей переходу теплоносителя из газообразного в жидкое состояние и расплавление припоя, с образованием при последующем охлаждении паяного соединения между контактной площадкой и выводом компонента.

Когда температура платы повышается до температуры жидкости, процесс конденсации прекращается, соответственно, заканчивается и нагрев припойной пасты. Повышение температуры платы от начальной до температуры плавления пасты происходит очень быстро и трудно поддается регулированию. Поэтому, для уменьшения термических напряжений в элементах конструкции в технологический процесс вводится предварительный подогрев. Максимальная температура нагрева припойной пасты также не регулируется и определяется температурой кипения рабочей жидкости. Насыщенный пар получают при кипении фторорганических жидкостей, которые имеют температуру кипения на несколько десятков градусов превышающую температуру плавления припоя.

Рабочие жидкости-теплоносители должны обладать следующими свойствами: химической инертностью; устойчивостью к окислению; температурной стабильностью; низкими вязкостью и поверхностным натяжением; хорошей смачиваемостью; высокими диэлектрическими характеристиками; не горючестью и легкой испаряемостью.

В наибольшей степени этим свойствам удовлетворяют фторорганические соединения, которые получают путем замещения атомов водорода органическими структурами. Требуемый для конденсационной пайки уникальный набор свойств в значительной степени определяется сильной химической связью между атомами углерода и фтора. Для конденсационной пайки используются следующие виды фторорганических соединений: перфторуглеродные, перфтортриаминаминные, перфторфенантренные, фторополиэфирные. Температура их кипения находится в диапазоне от 174°C (FC-43) до 253°C (FC-71). Недостатками этих жидкостей являются относительно низкая молекулярная масса, и соответственно, низкая плотность пара, что обуславливает его большие расходы в процессе пайки. Некоторые жидкости этой серии имеют относительно низкую температурную стабильность, что приводит с их разложению при перегреве с выделением высокотоксичного газа перфторизобутилена и фтористоводородной кислоты. Более высокой стабильностью в этом отношении отличаются жидкости FC5311, FC5312.

Основной частью установки для пайки в паровой фазе является резервуар 1 со слоем рабочей жидкости 2 на дне (рис. 7.27). Пар 3 образуется за счет нагрева до кипения с помощью либо внешних, либо встроенных нагревателей 4. Для предотвращения утечки пара в верхней части резервуара расположены змеевики 5. По мере прохождения смонтированной платы 6 над кипящей жидкостью пар конденсируется

над всей ее поверхностью, быстро и равномерно прогревая до температуры пайки. В качестве жидких теплоносителей используются перфторированные инертные жидкости с температурой кипения несколько выше температуры плавления оловянно-свинцового припоя, например, наиболее распространенный теплоноситель Fluoronert Liquid C-70 имеет температуру кипения 215°C. С целью предотвращения утечки паров дорогого фторуглерода поверх основной технологической среды создается защитная среда из фреона. Недостатками процесса являются: длительность процесса пайки (40–50 с), высокая стоимость жидкого теплоносителя, потери рабочей жидкости в атмосферу, образование различных кислот на границе раздела жидкостей.

В установках конвейерного типа IL-6 - IL-24 фирмы HTC Product (США) имеется транспортер для ввода изделия в камеру, дополнительные холодильники, вакуумные шлюзы, что исключает применение дополнительной защитной жидкости. Недостатком парофазной пайки является ее критичность к использованию канифольных флюсов, остатки которых нерастворимы в рабочей жидкости и, попадая на нагреватель, снижают его теплоотдачу. При повышении плотности мощности более 10 Вт/см² происходит локальный перегрев рабочей жидкости и ее разложение с выделением высокотоксичного газа перфторизобилена, что может привести к отравлению персонала.

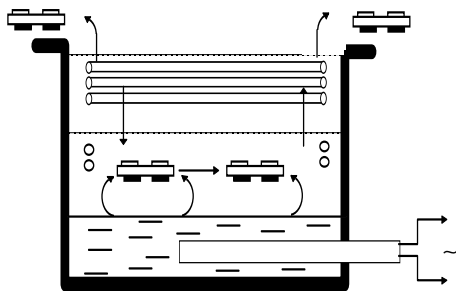


Рис. 7.27. Схема установки пайки в паровой фазе камерного типа

Для автоматизированной установки поверхностно монтируемых компонентов и их пайки выпущена линия «ТЕМП-4000», которая включает модуль трафаретной печати для нанесения лудящих паст, модуль установки компонентов и установку пайки. Номенклатура устанавливаемых компонентов: резисторы P1-11 (МЭЛФ), P1-12 (чип),

конденсаторы К10–17, транзисторы в корпусах КТ-27, КТ-28, КТ-46, КТ-47, интегральные микросхемы в корпусах 2, 4, Н, Ф. Рабочие температуры жидкостей – теплоносителей: 180 ± 5 , 235 ± 5 °С. Производительность установки пайки составляет до 30 сборок/ч. Установка работает без использования защитной жидкости – хладона 113. Мощность, потребляемая установкой – 1,6 кВт.

Рекламируемый в 80–годах процесс пайки SMD в парогазовой фазе ввиду таких недостатков, как дефицитность инертных жидкостей, разогрев до температуры пайки всей платы и компонентов, низкая скорость нагрева, экологические проблемы разложения жидкости значительно сократил область применения. С целью устранения этих недостатков в середине 90–х годов был разработан метод впрыскивания, когда для получения пара определенное количество рабочей жидкости подавалось на электроплитку и сразу испарялось. Это позволяло сравнительно быстро достичь температуры пиковой зоны, однако приводило к перегреву пара и окислению паяемых поверхностей [124].

Компанией Asscon, производящей оборудование для конденсационной пайки в течение 10 лет, разработаны конденсационные печи VP 2000 Inline, в которых реализовано программное управление температурным градиентом нагретой зоны. Это препятствует резкому переносу тепла при обваливании слоя пара, как это происходило в первых печах конденсационной пайки. На поверхности изделия постоянно находится слой конденсата, гарантирующий отсутствие кислорода во время всего процесса пайки. После выхода электронного модуля из зоны пайки этот слой жидкости испаряется с поверхности без остатка.

В настоящее время широкое применение для пайки SMD получили ИК печи оплавления припоя. Печи фирмы Electrovert Omni Flex (рис. 7.28) имеют комбинированный конвейер с программным управлением его шириной 300–500 мм, управляемую скорость воздушного потока с градиентом температур ± 1 °С, температурой нагрева в пределах 150–350°С, систему бесперебойного электропитания.



Рис. 7.28. ИК печь оплавления припоя Omni Flex

Электронные сборки с плотным двухсторонним смешанным монтажом представляют технологически сложную задачу для серийного производства. На плате может размещаться до 90% компонентов поверхностного монтажа, а остальное – разъемы, переключатели и трансформаторы, выводы которых монтируются в отверстия платы. Пайка таких компонентов выполняется, как правило, вручную и приводит к увеличению трудозатрат и существенному влиянию человеческого фактора. Наиболее эффективной технологией их сборки является нанесение паяльной пасты, установка SMD, оплавление в конвекционной печи, установка компонентов в отверстия и пайка по **селективной технологии**. Для селективной пайки фирмой Ersa разработаны установки Versaflex и Versaflex Multiwave, которые имеют модуль предварительного нагрева комбинированного типа (снизу – ИК нагрев, а сверху–конвекционный), модуль волнообразователя с сервоприводом, который обеспечивает программируемую селективную пайку выводов разъемов и других компонентов, монтируемых в отверстия платы. Набор сменных насадок (рис. 7.29) позволяет подобрать оптимальный по скорости и качеству режим пайки для соединений с различными диаметрами контактных площадок.

Для мелкосерийного многоменклатурного производства фирмой ZIPA-TEC выпущены универсальные и гибкие в работе установки Ecoslect 250 и 460, управляемые контроллером Siemens S7.

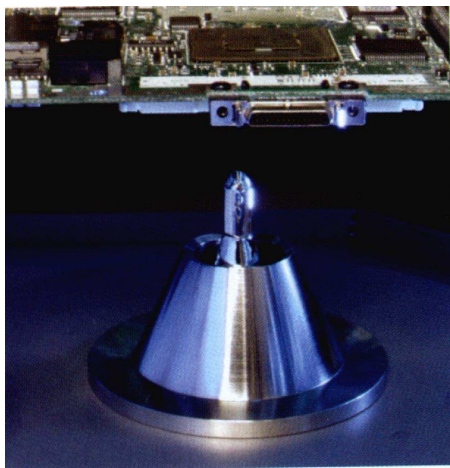


Рис. 7.29. Сопловые насадки для селективной пайки

Система подачи азота в рабочую зону понижает окисление, расширяет технологическое окно процесса, уменьшает риск образования перемычек и улучшает растекание припоя.

Флюсующая и паяльные головки перемещаются по осям X–Y с помощью сервопривода в рабочем режиме со скоростью 0,2–1,0 м/мин, а от одной зоны пайки к другой – со скоростью до 15 м/мин. Модуль предварительного ИК нагрева состоит из отдельных нагревателей мощностью 1700 Вт и позволяет задать по программе требуемый температурный профиль нагрева. Дополнительно могут быть установлены модули конвекционного нагрева горячим воздухом для теплоемких многослойных плат с металлизированными отверстиями.

Скорость пайки плат составляет 5 мм/с. Время работы оператора по загрузке платы, включению флюсователя и волны, приему платы – 12 с, время флюсования – 2 с, пайки – 12 с, полный цикл – 30 с. Установки отличаются быстрой переналадкой сопел, возможностью работы с бессвинцовыми припоями.

Глава 8. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ПАЙКА И МЕТАЛЛИЗАЦИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

8.1. Физические модели воздействия энергии ультразвукового поля на расплавы

Введение упругих механических колебаний УЗ частоты 18–70 кГц в расплавленный припой создает в нем кавитацию и ряд сопутствующих явлений: давление УЗ волны, микро- и макропотоки [125,126]. При интенсивностях ультразвука более 10^5 Вт/м² кинетическая энергия захлопывающихся пузырьков, сконцентрированная в ничтожно малом объеме, трансформируется частично в силовой импульс и частично в тепловую энергию. Из центра захлопнувшегося пузырька распространяется ударная сферическая волна, давление в которой достигает 100–150 МПа, а температура по

расчетным данным – 1000^0 С и выше [127]. Кавитационные явления и микропотоки в расплавленном припое приводят к разрушению оксидных пленок на поверхности металла. Давление звукового излучения, а также акустические течения в форме микро– и макропотоков способствуют ускорению процесса смачивания поверхностей припоем [128,129].

Активация расплава припоя энергией УЗ поля вызывает в расплаве при интенсивностях ультразвука $(8-10) \cdot 10^3$ Вт/м² появление маленьких пузырьков – зародышей кавитации. Их количество увеличивается с ростом газосодержания расплава или с введением в расплав мелких твердых частиц. Пузырьки, находящиеся в расплаве вблизи паяемой поверхности, пульсируют с частотой УЗ колебаний, расширяются и затем захлопываются, создавая ударные волны, давления в которых могут достигать значительных величин. Такие микроудары разрушают оксидные пленки и загрязнения на паяемой поверхности, которая затем хорошо смачивается припоем. Появляющиеся в кавитационной области микро– и макропотоки уносят частицы оксидов и загрязнений, перемешивают расплав, а микроудары способствуют абразивному воздействию частиц твердой фазы, находящихся в расплаве припоя. Кавитация в жидкости вызывает такие эффекты, как ускорение химических реакций, эрозию, звуколюминисценцию и играет главную роль при осуществлении процессов УЗ активации [126]. Одновременно с процессом кавитации в жидком припое вблизи излучающей поверхности инструмента появляются вторичные эффекты, такие как микро– и макропотоки, которые способствуют удалению оксидных пленок и ускорению процесса смачивания поверхности металла припоем. Высокие температуры захлопывающихся кавитационных пузырьков (до 1000^0 С) увеличивают температуру расплава, химическую активность участвующих в соединении материалов и интенсифицируют процессы физико-химического взаимодействия между ними. При высокой интенсивности УЗ поля в расплаве возникают и другие эффекты: переменное звуковое давление, «звуковой ветер», кумулятивные течения.

Для выявления наиболее существенных эффектов необходимо провести анализ энергетических показателей их воздействия. Так, например, если УЗ давление в жидкости при скорости колебания частиц 0,2 м/с составляет $2 \cdot 10^5$ Па, то давление в кавитирующих полостях достигает $(1-5) \cdot 10^8$ Па. «Звуковой ветер» пропорционален градиенту плотности потока энергии ультразвука, при этом скорость его оказывается на несколько порядков меньше колебательной скорости

частиц, которая в свою очередь значительно меньше скорости движения стенок кавитирующей полости в момент ее захлопывания. Поэтому сила «звукового ветра» не превышает $(2-3) \cdot 10^4$ Вт/м². Однако с учетом макрохарактера перемещений жидкости под действием кумулятивных течений, возникающих в момент захлопывания кавитационной полости, они являются фактором, обеспечивающим перемешивание всей массы жидкости в кавитационной области.

Таким образом, наиболее существенными эффектами, возникающими в расплаве припоя при воздействии ультразвука, следует считать кавитацию и акустические микро- и макропотоки. Эти явления носят нелинейный характер и сопровождаются возникновением разрывов в сплошной жидкой среде и переносом массы вещества. Степень проявления нелинейности эффектов при определенном давлении и температуре определяется акустическим числом Маха [130]:

$$M = \frac{V}{c} = \frac{2\pi f A}{c} \quad (8.1)$$

Нелинейные эффекты возникают при значениях числа Маха более $1 \cdot 10^{-4}$, таким образом, достаточно чтобы амплитуда колебаний на частоте 22 кГц была более 5 мкм.

Появление акустической кавитации тесно связано с наличием в жидкостях и расплавах зародышей кавитации – микроскопических газовых пузырьков. Реальные жидкости и расплавы содержат нерастворимые примеси, которые могут быть жидкими, твердыми и газообразными. Зародышами или ядрами кавитации могут служить нерастворенные пузырьки газа, находящиеся во взвешенном состоянии. Кроме того, зародыши кавитации могут образовываться на твердых несмачиваемых жидкостью частицах, имеющих трещины, заполненные нерастворимым газом. Поскольку поверхность трещины не смачиваемая, то заходящая в трещину жидкость будет образовывать относительно газа выпуклый мениск с радиусом R . Условие равновесия на границе раздела определяется выражением [131]:

$$P_z - P_n - P_o = -2\sigma/R. \quad (8.2)$$

Если угол смачивания $\theta \geq \pi/2 + \alpha$, то поверхностное натяжение препятствует продвижению жидкости в глубь трещины. При увеличении давления парогазовой смеси внутри пузырька кривизна поверхности раздела между жидкостью и газом меняет знак и газовый пузырек выступает из трещины в виде сферического сегмента, при этом $\theta < \pi/2 + \alpha$. Часть его отрывается под действием гидродинамических сил и находится в жидкости во взвешенном состоянии. Для воды при

нормальных условиях броуновское движение частиц во взвешенном состоянии будет преобладающим при их радиусе $5 \cdot 10^{-7}$ м [132].

Процесс образования зародышей кавитации на сферических твердых частицах, находящихся во взвешенном состоянии в расплавах металлов, которые не содержат растворенного газа, рассмотрен в работе [131] при условии, что значения краевого угла смачивания для случая роста зародыша на дисперсных твердых частицах из неметаллических материалов радиусом 10^{-6} – 10^{-7} м составляют 100 – 174° . Как показал анализ, работа образования зародыша критического размера существенно зависит от размеров впадины. При значениях краевого угла смачивания больше 120° на сферической частице с конической впадиной, угол раствора которой больше 40° , а глубина больше половины радиуса частицы, работа зародышеобразования существенно ниже, чем для плоской поверхности.

Таким образом, твердая частица с дефектом в виде конической или сфероподобной впадины в указанных условиях рассматривается как центр образования зародышей кавитации. Такие частицы, с одной стороны, сохраняют потенциальные кавитационные зародыши в условиях положительных статических давлений (порядка 10^7 Па), с другой – могут существенно снизить величины работы и растягивающего давления, необходимые для образования зародыша критического размера в расплавах металлов. Поэтому введение в состав припоя цинка, кристаллы которого не растворяются полностью, а также других частиц должно существенно увеличивать количество зародышей кавитации в припое.

Для оценки амплитуды акустического давления, необходимого для расширения зародыша до критического радиуса, применима теория равновесия. Полное давление P будет иметь максимальное отрицательное значение, когда

$$P = -P_A + P_O. \quad (8.3)$$

С учетом давления пара уравнение имеет вид:

$$\left| P - P_n \right| = P_A - P_O + P_n. \quad (8.4)$$

До УЗ активации имеет место равенство давлений на границе раздела сред:

$$P + P_n = P_O + \frac{2\sigma}{R_o}. \quad (8.5)$$

При воздействии энергией УЗ поля амплитуду давления увеличивают до тех пор, пока не будет достигнуто максимальное

отрицательное давление, при котором зародыш расширится до своего критического размера. Условием такого расширения является равенство:

$$P_n \left(\frac{R_o}{R_c} \right)^3 + P_c = -P_A + P_O + \frac{2\sigma}{R_o}. \quad (8.6)$$

Если исключить из этого равенства R_c , то получим выражение для амплитуды акустического давления, необходимого для расширения зародыша радиуса R_n до критического радиуса R_c . Зародыш радиуса R_o растет взрывообразно при увеличении амплитуды акустического давления до порогового значения $P_t^{(1)}$ (порог Блейка) [133]:

$$P_t^{(1)} = P_O - P_n + \frac{4\sigma}{3\sqrt{3}R_o} \left[1 + (P_O - P_n) \frac{R_o}{2\sigma} \right]^{-1/2}. \quad (8.7)$$

Откуда получаем выражение для критического радиуса:

$$R_c = \frac{4\sigma}{3(P_A - P_O + P_n)}. \quad (8.8)$$

Активация УЗ энергией существенно изменяет этот процесс, так как зародыш, пульсируя под действием поля, может расти за счет диффузии газа из жидкости в полость даже в том случае, когда жидкость не насыщена газом. Скорость газового потока, направленного внутрь пузырька в фазе разряжения, определяется выражение:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{8\pi}{3} D \cdot C_\infty \cdot R_o \left(\frac{P_A}{P_O} \right)^2, \quad (8.9)$$

где C_∞ - концентрация газа в жидкости на большом расстоянии от зародыша.

Для учета влияния поверхностного натяжения необходимо умножить правую часть на величину:

$$\left[1 + \frac{2\sigma}{R_o \cdot P_A} \right]. \quad (8.10)$$

Скорость, с которой газ диффундирует из пузырька в фазе сжатия, равна:

$$\frac{dm}{dt} = 4\pi \cdot D \cdot C_\infty \cdot R_o \cdot \left[1 + \frac{2\sigma}{R_o \cdot P_A} - \frac{C_\infty}{C_o} \right]. \quad (8.11)$$

Пороговая величина достигается тогда, когда потоки газа в обеих фазах периода равны. Непайрасом показано, что порог определяется выражением [134]:

$$\left[\frac{P_A}{P_o} \right]^2 = \frac{3}{2} \left[1 - \frac{C_\infty}{C_o} \cdot \left[1 + \frac{2\sigma}{R_o \cdot P_o} \right]^{-1} \right] \cdot \left[(1 - \beta^2)^2 + \delta^2 \beta^2 \right], \quad (8.12)$$

где

$$\beta^2 = \left[\frac{\omega}{\omega_o} \right]^2 = \frac{\rho \cdot R_o^2 \cdot \omega^2}{3 \cdot \chi \cdot P_o}. \quad (8.13)$$

Существует также амплитуда порогового давления $P_t^{(2)}$, при которой зародыш начинает расти за счет выпрямленной диффузии. Если P_A меньше этого порога для данного R_o , то свободный зародыш, растворяясь в результате диффузии, быстро исчезает. Порог $P_t^{(2)}$ Хи – Плессета для выпрямленной диффузии имеет вид:

$$P_t^{(2)} = \sqrt{\frac{2}{3}} P_o \left\{ 1 + \frac{2\sigma}{R_o P_o} - \frac{c_\infty}{c_o} \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (8.14)$$

где C_o – концентрация насыщенного газа при окружающем давлении P_o .

Численные расчеты на ЭВМ, в которых величину начального радиуса R_o варьировали в уравнении Кирквуда–Бете как параметр при заданной амплитуде давления P_m показали, что амплитуда пороговых давлений P_t^I (порог паровой кавитации Блейка) и P_t^2 (порог Хси – Плессета) для расплавов In, Ga и Fe при всех значениях R_o выше, чем для воды, причем для пузырьков с $R_o < 10^{-7}$ м величины P_t^I могут отличаться в 5–30 раз [131]. Значения резонансных частот для пузырьков с одинаковыми значениями радиусов для воды и расплава металла близки. Это объясняется тем, что пороги кавитации в основном определяются при заданном R_o величиной поверхностного натяжения, значения которого для расплавов металлов существенно выше (0,348–1,95 Н/м), чем для воды (0,075 Н/м), тогда как резонансная частота f_p зависит как от δ , так и от плотности расплава ρ [135]:

$$f_p = \frac{1}{2\pi R_p} \sqrt{\frac{3\gamma}{\rho} \left(P_o + \frac{2\sigma}{R_p} \right)}. \quad (8.15)$$

Сопоставление результатов аналитических оценок и численных расчетов для порогов P_{t1} и P_{t2} показывает, что для некоторого интервала значений они практически совпадают. Для расплавов индия интервал R_p составляет $7 \cdot 10^{-7}$ – 10^{-5} м, железа $4 \cdot 10^{-6}$ – $6 \cdot 10^{-5}$ м, а для воды $2 \cdot 10^{-7}$ – $1 \cdot 10^{-6}$ м. Поэтому взрывоопасный рост пузырьков в расплавах индия и железа

начинается после достижения ими радиуса, равного $7 \cdot 10^{-7}$ и $4 \cdot 10^{-6}$ м соответственно. Пузырьки с большими радиусами будут пульсировать в УЗ поле и увеличиваться в основном за счет выпрямленной диффузии.

Движение парогазового пузырька в УЗ поле описывается нелинейными дифференциальными уравнениями второго порядка и, в частности, уравнением Нолтинга – Непайраса [134]:

$$\frac{\partial^2 R}{\partial t^2} + \frac{3}{2R} \left(\frac{\partial R}{\partial t} \right)^2 = \frac{1}{\rho R} \left\{ P_o - P_a \sin \omega t - \left[\left(P_o - P_{II} + \frac{2\delta}{R_o} \right) \cdot \left(\frac{R_o}{R} \right)^{3\gamma} + P_{II} - \frac{2\sigma}{R} \right] \right\} \quad (8.16)$$

В жидкостях полости с радиусом $1 \cdot 10^5$ м начинают захлопываться при давлении $2 \cdot 10^5$ Па, а с радиусом $1 \cdot 10^6$ м – при $0,5 \cdot 10^5$ Па [135]. Однако для расплавов гидростатическое давление P_o столба жидкого металла в УЗ ваннах может иметь существенную величину. Поскольку в расплавленном припое отсутствуют пары воды и других легко испаряемых веществ, давление газа внутри пузырька начального радиуса R_o находится исходя из условия равновесия пузырька:

$$P_c = P_o + 2\sigma/R_o . \quad (8.17)$$

Зародыши кавитации, попадающие в область отрицательного давления теряют устойчивость, начинают расти на полупериоде растяжения и быстро захлопываются на полупериоде сжатия. Так как акустическое поле в жидкости неоднородно, это служит причиной поступательного движения кавитационного пузырька. При этом направление движения пузырька зависит от соотношения его действительного радиуса R и резонансного R_p . Если $R < R_p$, то кавитационные пузырьки пульсируют в фазе с полупериодом сжатия и поэтому перемещаются по направлению к пучности давления. Если $R > R_p$, то кавитационные пузырьки будут стремиться двигаться к узлам давления. Такое направленное движение кавитационных пузырьков в зависимости от соответствия их размеров величине R_p служит причиной возникновения коагуляционного механизма их роста. Так, например, в фокальную область источника ультразвука как бы засасываются пузырьки, в которых $R < R_p$, и одновременно с этим из этой области выбрасываются в виде развивающихся микропотоков пузырьки, у которых $R > R_p$. При захлопывании пузырька сконцентрированная в ничтожно малом объеме кинетическая энергия трансформируется частично в силовой импульс и частично в тепловую энергию, а из

центра захлопнувшегося пузырька распространится ударная сферическая волна. Максимальное давление, согласно Рэлею, на расстоянии, равном $1,587$ радиуса от центра пузырька, составит [136]:

$$P = P_o \frac{R_o^3}{6,35R^3}. \quad (8.18)$$

При $R = 1/10R_o$ величина давления вблизи поверхности пузырька в 1575 раз превышает давление внутри полости. Радиальная скорость сокращения пузырька V и время смыкания t зависят от соотношения гидростатического давления и плотности жидкости:

$$V = \sqrt{\frac{3P_o}{2\rho} \left[\left(\frac{R_o}{R} \right)^3 - 1 \right]}; t = 0.915 R_o \sqrt{\frac{\rho}{P_o}} \quad (8.19)$$

Время, необходимое для смыкания газового пузырька диаметром 10^{-4} м в воде, составляет $9,1$ мкс, а в оловянно–свинцовом припое – $29,9$ мкс [34]. Высокоскоростная видеосъемка цифровой камерой показала, что скорость захлопывания кавитационных полостей на частоте $22,8$ кГц и УЗ давлении 132 кПа около $0,2$ м/с [137].

Помимо высоких локальных давлений, возникающих при захлопывании кавитационных полостей, возможно образование и локальных тепловых микрополей. При адиабатическом сжатии и одном и том же относительном уменьшении объема газа повышение температуры тем больше, чем больше значение γ для данного газа. При интенсивности звуковой волны $(5-10) \cdot 10^4$ Вт/м² температура внутри газовых кавитационных пузырьков может повыситься до нескольких сотен и более градусов. Для ориентировочной оценки температуры внутри газового кавитационного пузырька в любой стадии его сжатия при адиабатических условиях можно использовать уравнение Нолтинга – Непайраса:

$$T_o R_o^{3(\gamma-1)} = TR^{3(\gamma-1)}. \quad (8.20)$$

Полагая, что $\gamma=4/3$ и температура расплава $250-300^\circ\text{C}$, и учитывая, что R может на порядок отличаться от R_o в сторону уменьшения, получаем температуры порядка $2600-3000^\circ\text{C}$. Другие авторы приводят расчетные данные порядка 1000°C и выше [127,138]. Высокие температуры, возникающие в пульсирующих кавитационных пузырьках, увеличивают химическую активность как припоя, так и материалов, создают предпосылки для интенсивного протекания

процессов химического взаимодействия между ними, поэтому необходимы более взвешенные оценки возникающих тепловых полей.

Пульсирование и захлопывание кавитационных полостей вызывает появление в областях, прилегающих к излучателю, микро- и макропотоков, которые имеют различное направление в зависимости от формы поверхности излучателя, амплитуды его колебаний, наличия препятствий на пути распространения и других факторов. Под микропотоками подразумеваются такие потоки, масштаб которых соизмерим с максимальными размерами кавитирующих полостей, а под макропотоками – масштаб которых значительно больше максимальных размеров кавитирующих полостей. Роль нелинейных диссипативных эффектов при распространения УЗ волны в жидкой среде определяет акустическое число Рейнольдса Re [130]:

$$Re = \rho V l / \eta = V l / \zeta, \quad (8.21)$$

где V – скорость потока; l – масштаб препятствия.

При средних размерах препятствий, определяемых для ванн лужения диаметрами обрабатываемых деталей 1–5 мм, акустическое число Рейнольдса составляет 40–150 ед. Таким образом, в УЗ макропотоках доминирует влияние вязкости жидкости или расплава и поэтому волна затухает раньше, чем успевают развиться нелинейные эффекты, приводящие к искажению формы потока и образованию в нем разрывов. Наилучшие условия для ускорения процессов массо- и теплообмена, протекания химических реакций взаимодействия паяемых материалов и припоя создают сформированные макропотоки, имеющие ориентированное направление от излучателя к обрабатываемой поверхности и стационарные во времени [34].

Одна из особенностей воздействия мощного ультразвука на процессы, протекающие в жидкостях и расплавах, – существенное увеличение высоты подъема жидкости и скорости ее прохождения в тонких капиллярах, так называемый ультразвуковой капиллярный эффект [139]. Теоретическими и экспериментальными исследованиями Н.В. Дежкунова, Г.Е. Коновалова был установлен кавитационный механизм УЗ капиллярного эффекта [140].

Вследствие потери устойчивости формы кавитационного пузырька его захлопывание может носить несимметричный характер, что служит причиной образования так называемых кумулятивных струй жидкости, радиус которых соизмерим с радиусом пузырька, а скорость близка к скорости захлопывания пузырька. При этом потенциальная энергия

пузырька преобразуется в кинетическую энергию струи, которая, попав в канал капилляра, вызывает увеличение высоты подъема жидкости. Если диаметр капилляра намного меньше максимального диаметра кавитационного пузырька ($d \ll D$), то при попадании струи в капилляр ее кинетическая энергия ΔE_c сообщается столбику жидкости в капилляре и расходуется на подъем жидкости на высоту Δh_n и соответственное увеличение потенциальной энергии, а также на работу против сил трения [141]:

$$\Delta E_c = \pi r^2 \Delta h_n \Delta P_{\Pi} + \frac{\rho V_{\Pi}^3}{2} S \lambda \frac{H_o}{d} \Delta t_{\Pi}, \quad (8.22)$$

где V_{Π} – скорость подъема жидкости в капилляре; S , r – площадь поперечного сечения и радиус капилляра; λ – коэффициент, зависящий от числа Рейнольдса, $\lambda = 64/Re$; H_o – длина столбика жидкости в капилляре; Δt_{Π} – время подъема.

Учитывая то, что $\Delta E_c = 4/3 \pi R_{\max}^3 P_o$, а время вытекания жидкости $\Delta t_{\Pi} = \Delta t_{\Pi} = T/(V_{\Pi} N)$, где R_{\max} – максимальный радиус пузырька; T – период колебаний; V_{Π} – объем цилиндра; N – количество пузырьков в объеме V_{Π} , а также параметры $P_a = 2 \cdot 10^5$ Па, $R_{\max} = 10^{-4}$ м, $r = 0,5 \cdot 10^{-4}$ м, $N = 10^{10}/\text{м}^3$, $f = 41,9$ кГц, избыточное давление в воде составит $3,6 \cdot 10^4$ Па. В расплавах припоев ввиду их большой вязкости величина избыточного давления, очевидно, будет меньшей [142]. При воздействии ультразвука максимальная высота подъема расплава 118 мм наблюдалась в капилляре диаметром 0,55 мм при интенсивности колебаний $16 \cdot 10^4$ Вт/м², время подъема составило 14–20 с, а максимальная скорость – 8 мм/с [143].

На межфазной границе припой-воздух однонаправленное УЗ давление от излучателя создает вспучивание поверхности припоя h . По данным М. Корнфельда при $|x| \leq r$, где x – текущая координата, r – радиус пучка ультразвука, давление компенсируется массой поднятой жидкости и давлением, вызванным искривлением поверхности. При $|x| > r$ давление колебаний близко к нулю, а масса поднятой жидкости компенсируется давлением, вызванным искривлением поверхности [144]. В этих двух случаях справедливы уравнения:

$$\sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) + \rho g z = p, \quad (8.23)$$

$$\sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) + \rho g z = 0, \quad (8.24)$$

где R_1, R_2 – главные радиусы кривизны поверхности, x, z – текущие координаты точки на поверхности жидкости.

Высоту подъема жидкости, т.е. значение z при $x=0$ можно найти по формуле:

$$h = \frac{\rho r^2}{\sigma} \cdot \frac{1 - \alpha r K_1(\alpha r)}{\alpha^2 r^2}, \quad (8.25)$$

где

$$\alpha = \sqrt{\frac{\rho g}{\sigma}}, \quad (8.26)$$

$K_1(\alpha r)$ – Бесселева функция мнимого аргумента.

Однако при этом не учитывается расстояние от излучателя и то, что расплав припоя обладает значительно большей плотностью и вязкостью.

Таким образом, обусловленные кавитацией в расплавах динамические и тепловые эффекты, возникновение микро- и макропотоков, подъем расплава по капиллярам определяют интенсификацию процесса формирования контактных соединений под действием энергии УЗ поля и способствуют существенному повышению качества соединений, а именно увеличению их прочности, достижению равномерности смачивания и растекания припоя. Однако для рационального выбора параметров УЗ активации необходимы модели динамического воздействия энергии УЗ поля на расплавы, учитывающие их свойства, а также различие в начальных размерах кавитационных полостей.

8.2. Моделирование динамического воздействия ультразвуковой энергии на расплавы

В жидких средах возникает два вида кавитации: стабильная и коллапсирующая, хотя граница между ними не всегда четко очерчена. Стабильные полости пульсируют под воздействием давления УЗ поля и существуют в течение значительного числа периодов звукового поля. Со стабильной кавитацией связано возникновение акустических микропотоков и высоких сдвиговых напряжений. Коллапсирующие полости осциллируют неустойчиво около своих равновесных размеров, вырастают в несколько раз и энергично захлопываются. Их активность проявляется в течение нескольких периодов УЗ поля, что обуславливает

высокие температуры и давления, а также преобразование энергии ультразвука в излучение света или химические реакции.

Динамика кавитационной полости в жидкости описывается уравнениями Нолтинга-Непайраса, Херринга-Флинна, Кирквуда-Бете [131], которые являются нелинейными дифференциальными уравнениями и решаются методами численного интегрирования (метод Рунге-Куты) с применением ЭВМ. Особенностью расплавов припоев, используемых для УЗ пайки и металлизации, являются значительно большие плотность и вязкость по сравнению с водой (примерно на порядок), необходимость учета гидростатического давления столба расплава, а также различие в начальных размерах кавитационных полостей. Гидростатическое давление P_0 с учетом давления столба расплавленного припоя высотой h может быть определено как [34]:

$$P_0 = P_{атм} + h\rho g . \quad (8.27)$$

Динамика кавитационных полостей в расплавах припоев описывается уравнением:

$$P_\partial + P_p + P_{вн} - P_n(R) = 0 , \quad (8.28)$$

где $P_\partial = \frac{3}{2}\rho \cdot \left(\frac{\partial R}{\partial t}\right)^2$ – динамическое давление потока,

$P_p = \rho \cdot R \frac{\partial^2 R}{\partial t^2}$ – равнодействующее давление,

$P_{вн} = P_0 + P_A \cdot \sin \omega \cdot t$ – внешнее давление,

$P_n(R) = \left(P_0 - P_n + \frac{2\sigma}{R_0}\right) \left(\frac{R_0}{R}\right)^3 + P_n - \frac{2\sigma}{R}$ – давление парогазовой

смеси в полости.

С учетом вязкости расплава уравнение (8.28) можно записать в следующем виде:

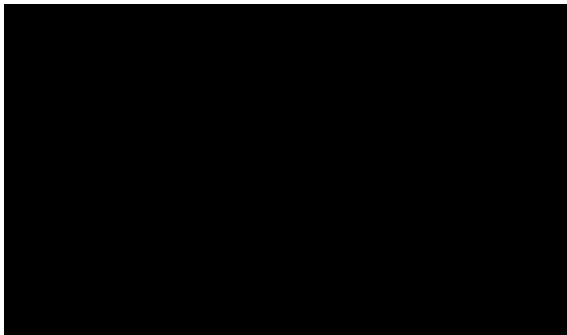
$$\left(R \frac{\partial^2 R}{\partial t^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{\partial R}{\partial t}\right)^2 + 4\eta \frac{\partial R}{\partial t}\right) \cdot \rho + P_0 - P_A \sin \omega t + \frac{2\sigma}{R} - P_n - \left(P_0 - P_n + \frac{2\sigma}{R_0}\right) \left(\frac{R_0}{R}\right)^3 = 0 . \quad (8.29)$$

Физический смысл данного уравнения состоит в том, что сумма действующих на любой элементарный объем расплава давлений равна нулю, т.е. кавитационная полость находится в состоянии динамического равновесия в каждый рассматриваемый промежуток времени. Решение нелинейного дифференциального уравнения (8.29) выполнено методом Рунге-Кутта-Мерсона с автоматическим изменением шага интегрирования и приближенной оценкой погрешности на каждом шаге

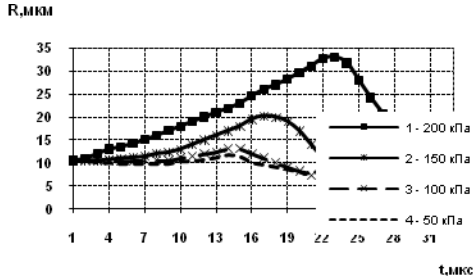
на ПЭВМ типа Pentium 3 для расплава оловянно–цинкового припоя вязкостью 0,85 Па·с. Варьировались начальные размеры кавитационных полостей от 4 до 14 мкм, давление ультразвука от $0,5 \cdot 10^5$ до $2 \cdot 10^5$ Па и частота УЗ колебаний 22, 44, 66 кГц [145]. Анализ расчетных данных показывает, что кавитационные полости размером до 5 мкм незначительно изменяют свои размеры и пульсируют не захлопываясь. С увеличением начального размера до 10–50 мкм увеличивается амплитуда их пульсаций и происходит ее захлопывание в течении 0,05 – 0,10 с (рис. 8.1, а).

При давлениях УЗ менее 0,1 МПа кавитационные полости пульсируют. С увеличением давления до 0,15 МПа увеличивается резонансный размер полостей и происходит их захлопывание (рис. 8.1, б). С ростом частоты с 22 кГц до 66 кГц размеры кавитационных полостей уменьшаются в среднем в 2 раза, что приводит к уменьшению интенсивности кавитации и к общему снижению локального кавитационного давления в припое (рис. 8.1, в).

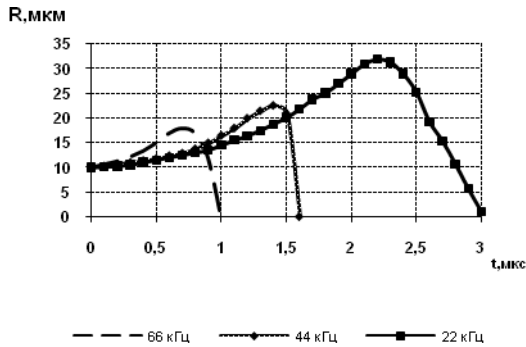
Для повышения эффективности кавитационных процессов применяют газовое насыщение расплава, когда вводимые в расплав пузырьки газа по размерам не превышают резонансные размеры зародышей кавитации в расплавах припоев, т.е. $(1-50) \cdot 10^{-6}$ м. Увеличение размеров пузырьков ведет к их преждевременному захлопыванию, а очень малые размеры – затрудняют кавитационный рост полостей в УЗ поле.



а



б



в

Рис. 8.1. Динамика кавитационных полостей в припое при соответствующих начальных радиусах полостей (а), давлениях ультразвука (б) и частотах (в)

Критерий эффективности кавитации может быть оценен по изменению объема полости V_{max}/V_{min} за долю периода $\Delta\tau/T$, приходящегося на стадию захлопывания [129]:

$$K = \frac{V_{max}}{V_{min}} / \frac{\Delta\tau}{T} = \frac{V_{max}}{V_{min} \Delta\tau f}. \quad (8.30)$$

Принимая кавитационную полость в виде пузырька сферической формы, получим:

$$K = \frac{R_{max}^3}{R_{min}^3 \Delta\tau f}. \quad (8.31)$$

Максимальная величина критерия эффективности в жидких средах достигается при соотношении $P_{зв} = 2 P_o$. При наибольшем соотношении $R_{max}/R_{min} = 10$ и $P_a = 0,2$ МПа на частоте 22 кГц в расплавах припоев $K = 0,46 \cdot 10^6$.

Косвенное подтверждение наличия локальных тепловых микрополей в жидком припое в режиме развитой кавитации получено путем наблюдения под микроскопом границы припоя с неметаллической прозрачной подложкой после воздействия УЗ колебаний на припой. Измерив с помощью микроскопа площадь расплавленных участков на поверхности прозрачной подложки, граничащей с припоем, и зная конкретную температуру расплавления материала, рассчитывают интенсивность кавитации в припое I_{κ} , возбуждаемой излучателем [146]:

$$I_{\kappa} = \frac{c(T_{nl} - T_{np})S_{nl}h\rho}{tS}, \quad (8.32)$$

где c – теплоемкость материала, T_{nl} , T_{np} – температуры расплавления материала и припоя, S_{nl} , S – площади расплавленных участков и зоны наблюдений, h – глубина расплавленных участков.

Для УЗ активации возможно использование различных видов механических колебаний, вводимых с помощью излучателей в жидкую фазу и являющихся по своей природе упругими волнами: продольных, сдвиговых, крутильных, комбинированных. В продольных волнах колебания частиц среды происходит в направлении распространения волны, а в сдвиговых – движение частиц перпендикулярно направлению движения волны. Поскольку жидкости и газы не обладают упругостью формы, в них возможно распространение лишь продольных волн. Однако в припое, который является вязкой жидкостью, возможно также образование вязких сдвиговых волн, которые затухают на малом расстоянии от источника [147]. При возбуждении сдвиговых волн конечной амплитуды в тонком слое расплава при условии, если его толщина $h/\lambda \sim 10^3$ в нем возникают вязкие волны, волновой вектор которых направлен перпендикулярно боковой поверхности излучателя [148]. Такие волны быстро поглощаются в направлении от колеблющейся поверхности и проникают на глубину:

$$\delta = \sqrt{\frac{\eta}{\pi \cdot \omega}}. \quad (8.33)$$

Расчетные глубины проникновения сдвиговой волны в расплавы припоя составляют 170–210 мкм, поэтому их влияние на расплав не существенно.

При возбуждении продольных колебаний на границах раздела сред УЗ волна частично отражается, интерферируя с падающей волной, частично проникает во вторую среду. Давления для падающей, проходящей и отраженной равны:

$$P_1 = \rho_1 c_1 v_1; \quad P_2 = \rho_2 c_2 v_2; \quad P_3 = -\rho_1 c_1 v_3; \quad (8.34)$$

где ρ_1, ρ_2 - плотности сред, c_1, c_2 - скорости распространения ультразвука в средах, v_1, v_2, v_3 - скорости падающей, проходящей и отраженной волн соответственно.

Учитывая, что коэффициенты отражения K_{omp} и прохождения K_{np} по давлению определяются как [134]:

$$K_{omp} = \frac{P_3}{P_1}; \quad K_{np} = \frac{P_2}{P_1}, \quad (8.35)$$

и с учетом того, что $Z_1 = \rho_1 c_1$; $Z_2 = \rho_2 c_2$ и при $x=0$ справедливо выражение

$$\begin{aligned} P_1 + P_3 &= P_2 \\ \frac{(P_1 - P_3)}{Z_1} &= \frac{P_2}{Z_2} \end{aligned} \quad (8.36)$$

Из (8.35) и (8.36) получим

$$K_{omp} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}; \quad K_{np} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}. \quad (8.37)$$

Анализ выражения (8.37) показывает, что коэффициенты прохождения и отражения существенно зависят от акустических свойств сред. При $Z_1=Z_2$ коэффициент отражения равен нулю и граница раздела акустически прозрачна. Поскольку $Z_1 \gg Z_2$, то есть удельные волновые сопротивления излучателей ультразвука выше удельных волновых сопротивлений жидких сред, то через границу излучатель-припой в случае колебаний, параллельных поверхности, проникает всего 54 % энергии, которая активизирует процессы кавитации, микро- и макропотоки. При колебаниях излучателя, нормально к поверхности, прошедшая в расплав УЗ волна испытывает затухание, распространяясь в пределах зазора δ , и в значительной мере проходит в поверхность, так как $K_{np} > 1$. Таким образом, только 20–25 % УЗ энергии участвует в активации расплава.

При введении в расплав припоя продольных колебаний, интенсивность которых нелинейно убывает при увеличении расстояния

от излучателя, необходимо поддерживать постоянной величину зазора в пределах 0,2–2,0 мм для исключения появления макро- и микротрещин в поверхностных слоях хрупких неметаллических материалов за счет ударного воздействия на них УЗ волны, направленной нормально к поверхности. Снижения динамического воздействия на паяемый материал достигают путем изменения угла введения колебаний в припой с 90° до $30\text{--}40^\circ$ [149].

Однако процесс пайки или металлизации при малых зазорах между торцом УЗ излучателя и паяемой поверхностью (порядка 0,1 мм) весьма сложен, поскольку требуется строгое поддержание величины зазора и малейшие погрешности могут привести к жесткому контакту излучателя с паяемой поверхностью хрупкого материала с появлением микро- и микротрещин за счет микроударов излучателя о поверхность подложки, а в отдельных случаях при наличии внутренних дефектов – разрушением изделий.

В процессах УЗ активации важно формировать микро- и макропотоки таким образом, чтобы они обеспечивали массоперенос микрообъемов припоя к паяемой поверхности и ускоряли тем самым протекание реакций химического взаимодействия компонентов припоя с материалами соединений. Увеличение величины угла наклона боковой излучающей поверхности к оси излучателя α от 20 до 45° должно вызвать появление в жидкой среде сформированного макропотока в направлении от излучателя к обрабатываемой поверхности, а зона его действия определяется амплитудой колебаний. В данном случае падающая УЗ волна частично отражается от границы раздела излучающая поверхность – жидкая среда, частично передается в последнюю в направлении вектора амплитуды колебаний A_2 . В результате равнодействующая векторов A_1 и $A_2\text{--}A_3$ формирует макропоток в жидкости в направлении к обрабатываемой поверхности. Колебания, параллельные поверхности, предпочтительнее энергетически и с точки зрения формирования направленных макропотоков в жидкой среде вблизи поверхности [150].

Направление и скорость микро- и макропотоков в вязких жидкостях и расплавах припоев в зависимости от геометрической формы излучающей поверхности ультразвукового инструмента, амплитуды УЗ колебаний оказывает влияние прочность соединений. УЗ колебания частотой 22 и 44 кГц и амплитудой 10–20 мкм вводились в глицерин с динамической вязкостью 1,48 Па/с и в расплав припоя П200А (10 Sn, остальное Pb) вязкостью 0,7 Па/с с помощью излучателей с различными величиной угла наклона боковой излучающей поверхности к оси

излучателя α и соотношением сторон излучающих поверхностей. Возникающие микро- и макропотоки в глицерине изучались под микроскопом МБС-2, в расплаве припоя вблизи границы припой-поверхность подогреваемого до 220°C кварцевого сосуда – под микроскопом ММР-2Р.

Скорость микропотоков определялась по движению частиц алюминиевой пудры размером 8–10 мкм, находящихся во взвешенном состоянии в вязкой жидкости и в расплаве. Микропотоки фотографировались при освещении импульсами света от лампы вспышки ИФК-120, питаемой от генератора импульсов напряжения частотой 10–50 Гц и длительностью 9 мс. Измерив на экране проектора длину трека, оценивали скорость микро- или макропотока в данной области жидкости или расплава (рис.8.2).

При величине угла α от 0 до 15–20° микропотоки в глицерине или расплаве припоя наблюдались у выступов и неровностей излучаемой поверхности и носили вихревой характер (рис. 8.3, а). Скорость таких микропотоков в глицерине составляла 0,02–0,05 м/с, располагались они главным образом вблизи плоскости излучающей поверхности и были удалены от обрабатываемой поверхности. Вследствие разной плотности глицерина в кавитационной и прилегающих к излучателю областях наблюдался медленный макропоток от излучающей поверхности вверх со скоростью 0,01–0,015 м/с.

Микропотоки в кавитационной области припоя вблизи границы раздела припой – кварцевый сосуд также носят вихревой характер, имеют скорость 0,02–0,03 м/с и располагаются главным образом вблизи воздушных полостей, образовавшихся на несмоченных участках поверхности. При данной геометрии излучающей поверхности инструмента образующиеся микропотоки вблизи поверхности излучения носят локальный характер, массоперенос к обрабатываемой поверхности отсутствует, что не способствует интенсификации процесса ультразвуковой обработки и улучшению качества изделий.

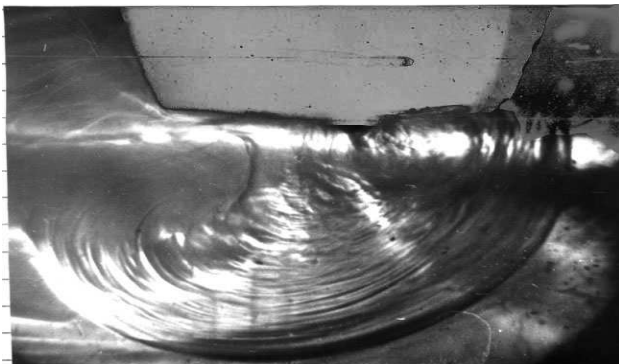


Рис. 8.2. Макропоток в вязкой жидкости

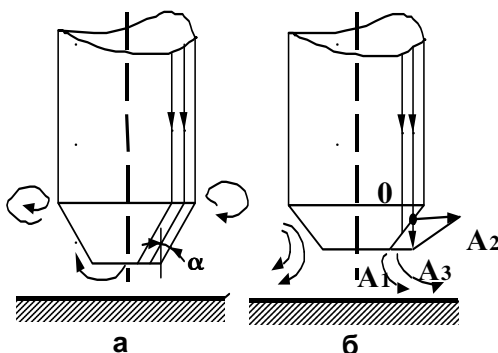


Рис. 8.3. Схема формирования макропоток в жидких средах

Увеличение угла α от 20 до 45° и уменьшение степени шероховатости излучаемой поверхности от $1,5$ до $0,35$ мкм вызывают появление в жидкости и расплаве сформированного общего макропотока в направлении от излучаемой поверхности инструмента к обрабатываемой поверхности детали. В данном случае падающая УЗ волна, частично отражаясь от границы раздела излучающая поверхность - жидкая среда, передается в жидкую среду в направлении вектора смещения A_2 (рис. 8.3, б). Равнодействующий вектор смещения A_3 , увлекает частицы жидкости и уносит их в направлении к обрабатываемой поверхности. При амплитуде УЗ колебаний 20 мкм скорость макропотока в глицерине на участке от излучателя до поверхности детали составляла $0,02$ м/с, а зона действия простиралась

до 10–13 мм. В расплаве припоя ввиду его большей плотности зона действия макротока не превышала 5–7 мм. С увеличением угла α свыше 60° направление микротока изменяется и становится аналогичным, как на рис. 8.3, а.

При распространении УЗ волны на границе припой-воздух однонаправленное УЗ давление от излучателя создает вспучивание поверхности припоя в виде волны. Высоту волны (рис. 8.4) в УЗ поле можно определить из условия перемещения определенного объема жидкости V при ее ламинарном течении под действием давления УЗ, которое преодолевает давления: атмосферное, поверхностного натяжения жидкости на поверхности раздела и столба жидкости [151]:

$$(P_{уз} - P_{атм} - P_{ж} - P_{н}) = \frac{2,5\eta HV}{R^4 t}, \quad (8.38)$$

где R – радиус излучателя.

Давление столба жидкости над излучателем определяется

$$P_{ж} = \rho \cdot g \cdot H, \quad (8.39)$$

где H – высота столба жидкости над излучателем.

Поверхностное натяжение действует по границе поверхности жидкости:

$$P_{н} = \sigma \cdot S = \frac{4\sigma}{\pi D^2}. \quad (8.40)$$

Подставляя (8.39) и (8.40) в уравнение (8.38) получим

$$\rho c \varpi A - P_{атм} - \rho \cdot g \cdot H - \frac{4\sigma}{\pi D^2} = \frac{2,5\eta HV}{R^4 t}. \quad (8.41)$$

Преобразуя (8.41) получим

$$h_2 = \sqrt{\frac{(\rho c \varpi A - P_{атм} - \rho \cdot g \cdot H - \frac{4\sigma}{\pi D^2}) R^2 t}{8\eta}}. \quad (8.42)$$

Для решения задачи в MathCAD формулу преобразуем

$$\varpi A = \frac{h_2^2 8\eta + P_{атм} R^2 t + 4\sigma R t + H \rho g R^2 t}{R^2 t \rho c}. \quad (8.43)$$

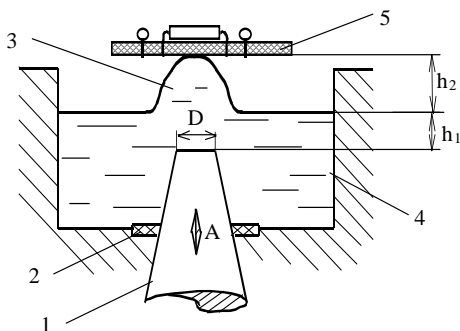


Рис. 8.4. Схема образования мини волны припоя: 1 - излучатель, 2 - акустическая развязка, 3 - волна, 4 - ванна, 5 - электронная сборка

Расчетные зависимости высоты подъема от скорости ультразвука для расплавов (рис. 8.5) показали, что подъем происходит тогда, когда УЗ давление превышает атмосферное.

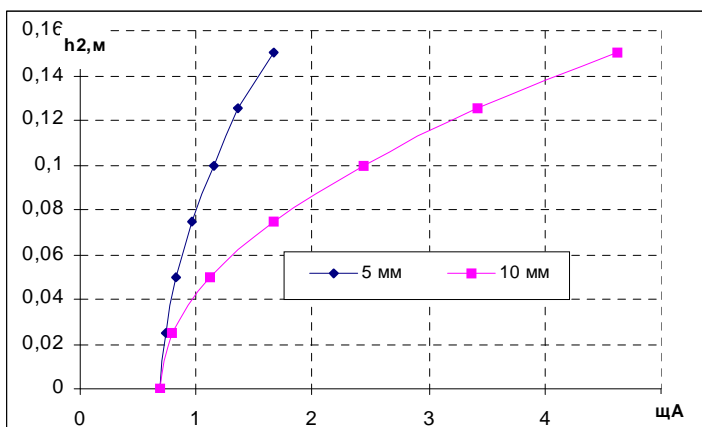


Рис.8.5. Зависимости высоты подъема расплава от скорости ультразвука и радиуса излучателя

Высота подъема в значительной степени зависит от радиуса излучателя, но несколько больше экспериментально определенной, так как модель не учитывает поглощение УЗ колебаний при их распространении в ограниченном объеме.

8.3. Удаление оксидных пленок и интенсификация процесса смачивания

В обычном состоянии поверхность металлов покрыта оксидными и неметаллическими пленками. При контакте металлов с газовой средой, органическими и неорганическими веществами образуются неметаллические пленки, которые могут быть с ван-дер-ваальсовой, ионной валентной или ковалентной связями с подложкой. Перед пайкой неметаллические слои органического происхождения (жировые загрязнения, смазку) удаляют с помощью растворителей. Оксидные пленки, препятствующие осуществлению физического контакта и взаимодействию припоя с паяемым металлом, удаляются механическим способом или травлением в специальных реактивах.

При пайке в процессе нагрева предварительно очищенных деталей оксидные пленки снова начинают расти, особенно при нагреве на воздухе. Процесс окисления определяется химическим средством металла к кислороду, температурой и длительностью нагрева. Удаление оксидных пленок при пайке с поверхности металлов и сплавов без флюса может быть осуществлено путем диссоциации оксидов в вакууме, инертных или восстановительных средах, а также с помощью механического воздействия или ультразвуковых колебаний.

Поскольку направление реакции окисления металла определяется температурой и давлением кислорода в окружающей среде [152]:

$$K_p = \frac{P_{Me}^n P_{O_2}^{m/2}}{P_{Me_n O_m}}, \quad (8.44)$$

где K_p – константа равновесия; P_{Me} , P_{O_2} , $P_{Me_n O_m}$ – соответственно давление паров металла, кислорода и оксида, уменьшение парциального давления кислорода в газовой среде и увеличение температуры смещают равновесие в сторону диссоциации оксида. Таким образом, достигается полное разложение оксидов металла при пайке в нейтральных газовых средах и вакууме.

Анализ зависимостей давления диссоциации оксидов от температуры и парциального давления кислорода показывает, что обеспечить условия диссоциации оксидов многих металлов не представляется возможным ввиду необходимости необычно низкого парциального давления кислорода, которое при температуре 1150°C для железа и хрома составляет 10^{-8} – 10^{-13} Па, марганца – 10^{-6} , титана – 10^{-19} и для алюминия – 10^{-25} Па [153]. Такую степень вакуума достичь с

помощью современного вакуумного оборудования невозможно. Другим затруднением при нагреве в глубоком вакууме является испарение самих металлов, особенно цинка, кадмия, марганца и магния.

При пайке металлов в активных газовых средах удаление оксидной пленки с поверхности основного металла и припоя происходит в результате восстановления оксидов активными компонентами газовых сред, в качестве которых используют водород или окись углерода. Однако при этом неизбежно взаимодействие металлов с компонентами газовых сред, а также с примесями в них кислорода и паров воды. В процессе пайки наиболее вредное воздействие на расплавленный припой оказывает водород, поскольку взаимодействие его с расплавом припоя протекает наиболее активно. Наличие водорода в паяном шве может привести к появлению водородной хрупкости, образованию трещин, пор и других дефектов. Ряд металлов, таких, как свинец, кадмий, олово, титан, цирконий, образует при пайке в восстановительной среде гидриды, поэтому пайка их в водородной среде нецелесообразна [153].

Сущность механического способа удаления оксидных пленок с поверхности паяемого металла заключается в их разрушении под слоем жидкого припоя с помощью режущего инструмента или абразивного материала, при этом припой защищает паяемую поверхность металла от воздействия кислорода и вступает с ней в физический контакт. В качестве режущего и абразивного инструмента используют металлические щетки, сетки, пемзу, в качестве абразивных материалов – металлические порошки, асбест, вводимые в припой в мелкоизмельченном виде. Абразивные порошки, вводимые в расплав припоя, должны иметь меньшую плотность по сравнению с припоем для всплывания на поверхность.

При механическом удалении оксидных пленок используют также припои с широким температурным интервалом плавления, например оловянно-цинковые (4–50% Zn), где роль абразива могут выполнять первичные кристаллы Zn и Sn в припое. Процесс удаления оксидной пленки при этом ведут при температурах ниже температуры ликвидуса, но выше солидуса припоя, когда первичные кристаллы разделены друг от друга жидкой фазой. Недостатки бесфлюсовой низкотемпературной пайки с абразивным удалением оксидной пленки – низкая производительность процесса, неравномерность толщины слоя лужения, наличие необлуженных мест ввиду трудности контроля процесса разрушения пленки, загрязнение припоя частицами абразива.

Наиболее важны процессы бесфлюсовой пайки при сборке

электронных устройств и приборов, где требуется исключить применение флюсов, поскольку продукты их разложения способствуют развитию коррозионных процессов, при этом ухудшаются рабочие характеристики полупроводниковых приборов и интегральных схем, снижаются надежность и долговечность электронной аппаратуры [154]. При пайке микрополосковых плат, кремниевых кристаллов полупроводниковых приборов к неметаллизированным керамическим подложкам предложено удалять оксидные пленки с помощью вибраций одной из соединяемых деталей, преимущественно верхней, а вторая остается неподвижной в течение всего процесса [155].

Притирка осуществляется на установках типа ЭМ–4025, ЭМ–415, ЭМ–445 передачей вибраций частотой 1–100 Гц на соединяемые детали [105] (рис. 8.6). При перемещении паяемой поверхности платы 3, закрепленной в держателе 2, относительно основания 5 в параллельной плоскости с помощью вибратора 1 с амплитудой до 1 мм оксидные пленки на паяемых поверхностях 4 разрушаются. Процесс пайки осуществляется без флюсов в интервале температур 130–610°C в течение 30–60 с. Прочность паяных соединений при этом достаточно высокая и превышает значения, полученные в случае пайки в среде защитных газов [156].

Для эффективного удаления оксидных пленок с поверхности расплава необходимо, чтобы работа сил вибрации значительно превосходила работу сил когезии расплава:

$$W_{\text{вибр}} \geq (5-10)W_{\text{ког}}. \quad (8.45)$$

Работа сил вибрации по перемещению кристалла площадью S составит:

$$W_{\text{вибр}} = Ist, \quad (8.46)$$

где I – интенсивность колебаний, t – время.

Работа сил когезии затрачивается на образование двух единичных поверхностей расплава с поверхностной энергией $\sigma_{1,2}$ на площади S :

$$W_{\text{ког}} = 2\sigma_{1,2}S. \quad (8.47)$$

Учитывая, что интенсивность колебаний в расплаве равна:

$$I = 0,5\rho c(\omega A)^2, \quad (8.48)$$

где ρ – плотность расплава, c – скорость распространения колебаний, ω – круговая частота, A – амплитуда колебаний, получим:

$$\rho(\omega A)^2 t \geq (20-40)\sigma_{1,2}. \quad (8.49)$$

При амплитуде колебаний 250–500 мкм с частотой 5 Гц в течение 1

с работа сил вибрации в расплаве составляет 0,5–1,0 Дж, что в среднем на три порядка превышает работу сил когезии расплава в свободном состоянии (0,5 мДж), что вполне достаточно для вытеснения оксидных пленок из зоны пайки.

К недостаткам метода притирки следует отнести длительность процесса (до 60 с), необходимость обеспечения высокой степени параллельности плоских поверхностей паяемых деталей, воздействие вибраций значительной амплитуды на навесные элементы.

Введение упругих механических колебаний УЗ частоты в расплавленный припой вызывает в нем кавитацию, а также ряд сопутствующих явлений: радиационное давление, микропотоки. Разрушение оксидных пленок металлов происходит в основном за счет действия кавитации в жидком припое, тогда как вторичные эффекты ультразвука способствуют перемешиванию припоя и ускорению процесса лужения. Отрыв оксидных пленок вызывается высокими местными давлениями (порядка 10^5 МПа), возникающими вблизи захлопывающихся кавитационных пузырьков.

Схематично разрушение оксидной пленки 1 на поверхности алюминия 3 показано на рис. 8.7. Стрелками отмечены направления гидродинамических ударов, возникающих при захлопывании кавитационных пузырьков. Вскрытая от окисной пленки поверхность основного металла равномерно смачивается припоем 2. Возможный механизм разрушения хрупкой оксидной пленки определяется ее раскалыванием и отслоением в результате микроударов, появляющихся при захлопывании кавитационных пузырьков.

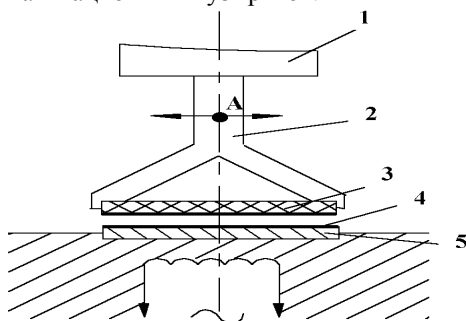


Рис. 8.6. Схема пайки с притиркой паяемых поверхностей

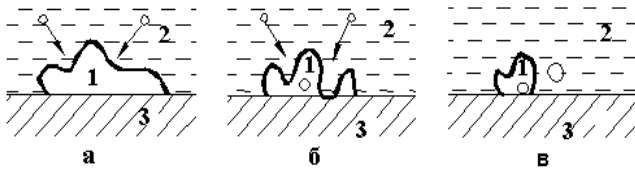


Рис. 8.7. Последовательность разрушения оксидных пленок при кавитации (а–в)

Этот процесс был изучен с помощью высокоскоростной киносъемки [137]. В случае если при интенсивных колебаниях пульсирующего кавитационного пузырька силы сцепления пленки с поверхностью превосходят прочность самой пленки, то свободные кусочки пленки отрываются от поверхности (рис. 8.8, б). Если прочность пленки превосходит силы сцепления, то вся пленка отслаивается от поверхности.

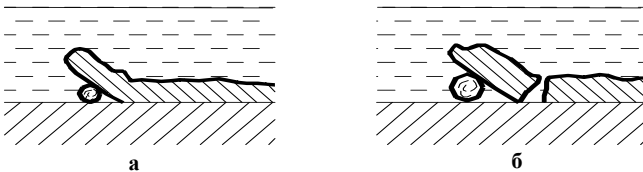


Рис. 8.8. Схема отслоения пленки пульсирующим кавитационным пузырьком

Схема процесса УЗ лужения металлов с помощью излучателя, перемещаемого вдоль облуживаемой поверхности, показана на рис. 8.9. Излучатель 3, погруженный в припой 2 и находящийся на определенном расстоянии от поверхности, чаще всего от 0,2 до 2 мм, создает в расплавленном припое интенсивную кавитацию. Возникающие при захлопывании кавитационных пузырьков 4 гидродинамические удары разрушают оксидную пленку 1 на поверхности металла 6, освобождая доступ припоя к паяемой поверхности и обеспечивая ее смачивание. Образующиеся при этом шлаки 5 всплывают на поверхность припоя. При ручном лужении слой припоя недостаточно равномерный, прочность сцепления имеет также значительный разброс.

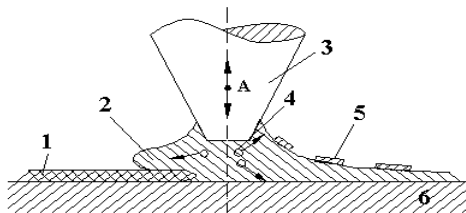


Рис. 8.9. Схема процесса ультразвукового лужения металлов

УЗ лужение металлов в кавитационном режиме сопровождается заметной эрозией основного металла. Весовой коэффициент эрозии K зависит от количества абразивных частиц или первичных кристаллов в расплаве N [152]: $K = \Delta V_{\text{ср}} \rho N / M$, где M , ρ – масса и плотность образца; $\Delta V_{\text{ср}}$ – средний объем металла, удаленного при лужении. Глубина эрозии возрастает с увеличением температуры и для алюминиевых сплавов при температурах порядка 260°C может достигать 0,5 мм, что ограничивает применение УЗ лужения для фольги толщиной менее 0,5 мм и проволоки диаметром до 0,5 мм. При введении в расплав припоя в качестве абразива порошка ферротитана глубина общей эрозии возрастает до 0,76 мм.

Кавитационный процесс в жидком припое, содержащем абразивный материал, может возникать при допороговых интенсивностях ультразвука. При таком способе лужения, получившем название абразивно-кавитационного, используются припои на основе олова с содержанием цинка 20–50%, микропорошка ферротитана 4–7%. Время лужения составляет 5–40 с при интенсивности ультразвука $(2-8) \cdot 10^4$ Вт/см². Температурный режим лужения алюминия для некоторых припоев приведен в табл. 8.1 [157].

Таблица 8.1

Температуры ультразвукового лужения алюминия

Припой	Вид абразива	Температура лужения, °С
Олово	4–5% ферротитана	140–280
П150А	Первичные кристаллы	153–163
П200А	4–5% ферротитана	180–260
П250А	Первичные кристаллы	180–260
П350А	Первичные кристаллы	300–320

Кавитационное давление, измеренное с помощью кавитометра, зависит от процентного содержания цинка в припое (рис. 8.10). Максимальное значение кавитационного давления (до 3,5 кПа) при интенсивности ультразвука 10^5 Вт/м² достигается при содержании цинка 30–50%. Дальнейшее увеличение цинка снижает жидкотекучесть расплава и, значительно увеличивает температуру лужения.

В процессе УЗ лужения часть энергии трансформируется в тепло и затрачивается на нагрев припоя, что создает эффект увеличения температуры расплава припоя Sn–Zn (рис. 8.11). Этот эффект в большей степени проявляется при длительном озвучивании припоя и увеличении процентного содержания цинка в расплаве. Таким образом, кавитация и вторичные эффекты ультразвука создают необходимые предпосылки для смачивания расплавом припоя поверхности твердого тела, сопровождающегося понижением угла смачивания и увеличением коэффициента растекания.

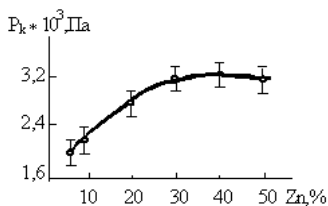


Рис. 8.10. Зависимость кавитационного давления в расплаве припоя от содержания цинка

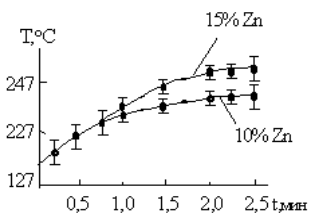


Рис. 8.11. Зависимости температуры расплавов припоев от времени воздействия ультразвука

Образование паяного соединения предполагает сближение взаимодействующих сред до расстояний межатомного взаимодействия, которое осуществляется на этапе смачивания расплавом припоя паяемой поверхности. Смачивание, являясь одним из важнейших факторов, определяющих адгезионную прочность спая, представляет особый вид взаимодействия жидкой и твердой сред.

Процесс смачивания основного металла припоем состоит в замене межатомных связей, возникших между металлами в твердой фазе, на металлическую связь атомов на границе раздела между ними. При этом взаимодействие сил поверхностного натяжения определяет контактный угол смачивания θ (рис. 8.12). Условию равновесия капли на поверхности отвечает минимум свободной поверхностной энергии E_n , под которой понимают избыток энергии поверхностных атомов

вследствие несбалансированности сил связи в решетке. Изменение поверхностной энергии описывается уравнением Юнга:

$$\frac{dE}{dS} = \delta_{1,3} - \delta_{2,3} - \delta_{1,2} \cos \theta = 0, \quad (8.50)$$

Из выражения (8.50) следует, что

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{1,3} - \sigma_{2,3}}{\sigma_{1,2}}. \quad (8.51)$$

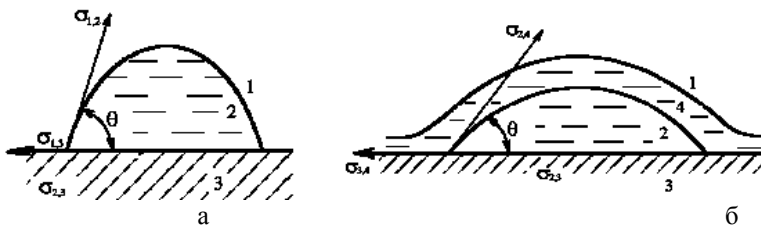


Рис. 8.12. Схема равновесия сил поверхностного натяжения в газовой (а) и во флюсовой средах (б): 1 газ; 2 припой; 3 основной металл, 4 – флюс

Величина $\cos \theta$ служит параметром количественной оценки степени смачивания [158]:

- 1) полное при $\cos \theta = 1, \theta = 0$;
- 2) ограниченное при $0 < \cos \theta \leq 1$ ($0 \leq \theta \leq 90^\circ, \sigma_{2,3} \leq \sigma_{1,3}$);
- 3) несмачивание при $-1 \leq \cos \theta < 0$ ($90^\circ \leq \theta < 180^\circ, \sigma_{2,3} > \sigma_{1,3}$)

Работа сил адгезии W_a связана с образованием межфазной границы с энергией $\sigma_{2,3}$ вместо единичных поверхностей с энергиями $\sigma_{1,2}$ и $\sigma_{1,3}$:

$$W_a = \sigma_{1,2} + \sigma_{1,3} + \sigma_{2,3}. \quad (8.52)$$

Для преодоления сил сцепления частиц внутри самой жидкости необходимо затратить работу сил когезии по образованию двух единичных поверхностей жидкости с энергиями $\sigma_{1,2}$, т. е.

$$W_k = 2\sigma_{1,2}. \quad (8.53)$$

С учетом выражений (8.52) и (8.53) формула (8.51) примет вид:

$$\cos \theta = \frac{2W_a - W_k}{W_k}. \quad (8.55)$$

Жидкие металлы и сплавы обладают более высоким поверхностным натяжением, чем неметаллические жидкости. Так, для припоя типа ПОС 61 $\sigma_{1,2} = 0,5$ Н/м, что на порядок превышает поверхностное натяжение воды. В этом случае образование связи под действием сил Ван-дер-

Ваальса не может обеспечить смачивание. Для выполнения при пайке условия смачивания на межфазной границе должны образовываться высокоэнергетические межатомные связи химической природы с большой работой сил адгезии W_a (металлические, металл–ковалентные и др.). Реальные пути улучшения смачивания заключаются в применении защитных газовых сред (снижение $\sigma_{1,2}$) и более тщательной очистке контактирующих поверхностей твердой и жидкой фаз от оксидных пленок (снижение $\sigma_{2,3}$). При рассмотрении условий равновесия системы "припой—основной металл" во флюсовой среде (рис. 8.12,б) вместо $\sigma_{1,2}$ вводят $\sigma_{2,4}$ (межфазное натяжение на границе "флюс—основной металл"). При этом $\sigma_{2,4} < \sigma_{1,2}$, $\sigma_{3,4} < \sigma_{1,3}$, а уравнение для краевого угла имеет вид

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{3,4} - \sigma_{2,3}}{\sigma_{2,4}}. \quad (8.56)$$

Для реализации условия смачивания в данном случае необходимо вытеснение припоем прореагировавшего флюса по мере удаления оксидной пленки с поверхности основного металла, что выполняется при $\sigma_{2,3} < \sigma_{3,4}$. При достаточном химическом средстве компонентов основного металла и припоя энергия $\sigma_{2,3}$ мала, а работа W_a велика. В этом случае реализуется второе условие смачивания: $W_a > \sigma_{2,4}$.

Растекание припоя по поверхности металла происходит в результате взаимодействия сил поверхностного натяжения и сопровождается сближением жидкой и твердой фаз. Коэффициент растекания определяют из условия разности работ сил адгезии и когезии:

$$Kp = W_a - W_k = \sigma_{1,2}(\cos \theta - 1) > 0. \quad (8.57)$$

Однако анализ выражения (8.57) показывает, что в случая полной смачиваемости поверхности при $\cos \theta = 1$, $\theta = 0$, он обращается в нуль, кроме того, по аналогии с другими параметрами смачивания он должен быть безразмерный величиной.

Предлагается определять коэффициент растекания припоя из условия отношения работ сил адгезии и когезии [159]:

$$Kp = W_a / W_k = \sigma_{1,2}(\cos \theta + 1) / 2\sigma_{1,2} = (1 + \cos \theta) / 2 > 0. \quad (8.58)$$

Тогда при полном смачивании $\cos \theta = 1$, $\theta = 0$; $K_p=1$; ограниченном $0 < \cos \theta \leq 1$, $0 \leq \theta \leq 90^\circ$, $K_p=0,5$; несмачивании $-1 \leq \cos \theta < 0$, $90^\circ \leq \theta < 180^\circ$, $K_p=0$.

При смачивании и растекании припой заполняет зазоры между соединяемыми деталями, образуя мениски вблизи вертикальных стенок и проявляя тем самым капиллярные свойства. Разность давлений, действующих на искривленную поверхность жидкости, определяет капиллярное давление p_k по уравнению Лапласа:

$$p_k = p_1 - p_2 = \sigma_{1,2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (8.59)$$

где p_1 , p_2 – давление жидкости для выпуклой и вогнутой поверхностей соответственно; R_1 , R_2 – радиусы кривизны поверхностей.

Для выпуклой поверхности P_k считают положительным и направленным внутрь жидкости, для вогнутой поверхности P_k отрицательно и направлено наружу от поверхности жидкости. При малом диаметре D капилляра свободная поверхность жидкости имеет форму сферы (рис. 8.13) радиусом

$$R = \frac{D}{2 \cos \theta}. \quad (8.60)$$

Подставив значение радиуса мениска в уравнение (8.60), получим

$$p_1 - p_2 = \sigma_{1,2} \left(\frac{2 \cos \theta}{D} + \frac{2 \cos \theta}{D} \right) = 4 \frac{\sigma_{1,2} \cos \theta}{D}. \quad (8.61)$$

Разность давлений $p_1 - p_2$ уравновешивается столбом припоя высотой h :

$$h \rho g = \frac{4 \sigma_{1,2} \cos \theta}{D}. \quad (8.62)$$

Из уравнения (8.62) следует, что высота подъема припоя в капилляре круглого сечения прямо пропорциональна его поверхностному натяжению и смачивающей способности и обратно пропорциональна диаметру капилляра и плотности припоя:

$$h = \frac{4 \sigma_{1,2} \cos \theta}{D \rho g}. \quad (8.63)$$

Отличие расплавов припоев от обычных жидкостей состоит в том, что жидкий припой представляет собой систему, состоящую из нескольких компонентов, и в процессе его растекания происходит физико-химическое взаимодействие компонентов и основного металла, дополнительное растворение элементов основного металла в припое,

взаимодействие с газовыми и флюсующими средами. При вытеснении припоем флюса из капилляра высота подъема припоя равна:

$$h_1 = \frac{4 \sigma_{1,2} \cos \theta}{D g (\rho_{\text{пр}} - \rho_{\text{ф}})}. \quad (8.64)$$

В горизонтальном капилляре шириной h для припоя с вязкостью η время заполнения t на длину капилляра l составит:

$$t = \frac{6\eta L^2}{\sigma_{2,3} \cos \theta h}. \quad (8.65)$$

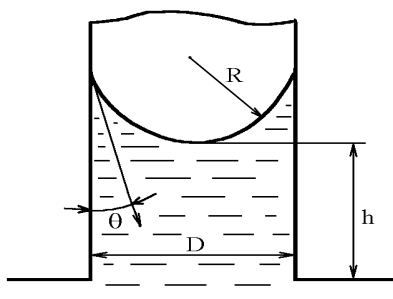


Рис. 8.13. Схема подъема жидкости в капилляре

Уравнение (8.65) может быть использовано для исследования процессов смачиваемости припоями поверхности твердых тел с известным допущением, поскольку в нем не учитывается сила тяжести капли жидкости и считается, что жидкость не взаимодействует с твердым телом. В реальных процессах пайки происходит активное взаимодействие припоя с паяемой поверхностью, поэтому капиллярные явления, протекающие при этом, будут более сложными. Процесс смачивания предшествует явлению растекания припоя, обусловленному гидродинамическим и металлургическим факторами. Первый связан с такими явлениями, как жидкотекучесть, вязкость, поверхностное натяжение припоев, второй зависит от характера взаимодействия припоя с основным металлом и связанного с этим изменения вязкости припоя, температуры плавления, интервала кристаллизации. Растекание припоя по поверхности материала зависит от соотношения сил адгезии припоя к поверхности и сил когезии, определяющих прочность связи между частицами припоя.

Определение краевых углов смачивания припоями никелевых,

железных и молибденовых подложек в вакууме 10^{-3} Па при нагреве до 1300–1400°C на установке высокотемпературной металлографии методом «лежащей» капли показало, что удовлетворительное смачивание в вакууме наблюдается в том случае, когда краевой угол не больше 40°. С увеличением времени выдержки до 1 мин краевой угол снижается до 26–30°. Для труднопаяемых металлов, таких, как титан, краевой угол не снижается ниже 90° при нагреве 1200°C [160]. В то же время возбуждение УЗ колебаний в припое практически мгновенно обеспечивает снижение угла смачивания и растекание капли припоя по поверхности подложки. Изучение динамики УЗ смачивания высокоскоростной киносъемкой показало, что его продолжительность составляет менее 0,02 с [161].

Таким образом, активация расплавленного припоя энергией УЗ поля – мощный и практически безынерционный фактор, обеспечивающий сближение взаимодействующих сред на расстояния порядка атомных и способствующий интенсификации физико-химических процессов. Однако физическая сущность влияния энергии УЗ поля на процесс смачивания выявлена еще недостаточно. Предложен ряд гипотез, объясняющих это явление.

Одна из них основывается на теории Я. И. Френкеля, в которой поверхностная энергия расплавов рассматривается как электростатическая энергия двойного электрического слоя, возникающего на поверхности металла. Поскольку электроны атомов наружного слоя металла обладают энергией, отличной от энергии электронов глубинных атомов, на границе расплав – твердое тело образуется своеобразный конденсатор, определяющий величину поверхностной энергии границы раздела, а, следовательно, и ее поверхностное натяжение. С этой точки зрения поверхностное натяжение расплавленного металла можно оценить как электрическую энергию конденсатора, отнесенную к единице площади. Для металла с валентностью z электрическое поле между обкладками, находящимися на расстоянии l , составляет [162] $E=4\pi ze/R^2$, где e – заряд электрона, равный $1,6 \cdot 10^{19}$ Кл. Умножая E на толщину конденсатора, равную R (R – расстояние между положительными ионами), определяем искомую разность потенциалов:

$$U=4\pi ze/R, \quad (8.66)$$

Полагая $R=(1-2) \cdot 10^{-10}$ м, $z = 2$, получим, что разность потенциалов составит 360–720 В.

При активации расплава энергией УЗ колебаний возникает

электрокинетический эффект, заключающийся в том, что в результате действия ударной волны двойной электрический слой сдвигается и на границе твердое тело – жидкость появляется разность потенциалов. Согласно предложенной гипотезе, роль энергии УЗ поля сводится к «разрядке» конденсатора на поверхности раздела, вследствие чего происходит «стирание» поверхностного натяжения и улучшение смачивания. Учитывая, что энергия плоского конденсатора равна:

$$W = \varepsilon_0 \varepsilon U^2 S / 2d, \quad (8.67)$$

где: U – разность потенциалов, S – площадь смачиваемой поверхности, d – толщина оксидной плёнки, то поверхностное натяжение электростатических сил, как энергия отнесенной к площади для $\varepsilon \leq 6-7$, составит примерно $1,5 \cdot 10^{-3}$ Н/м, что значительно меньше поверхностного натяжения припоя. Для эффективного смачивания необходима более высокая разность потенциалов, однако вследствие повреждения тонкой оксидной плёнки в УЗ поле обеспечить это невозможно.

Другие гипотезы теоретически и экспериментально доказывают, что при введении ультразвука тангенциальная составляющая колебательного движения σ_m соизмерима с величиной поверхностного натяжения σ_0 в невозмущенной среде. Поэтому физические свойства границы раздела фаз изменяются в сторону уменьшения энергии поверхностного натяжения $\sigma_{2,3}$, снижается краевой угол смачивания и улучшается процесс растекания припоя по паяемой поверхности [163]. Поверхностное натяжение в этом случае может быть записано в виде $\sigma = \sigma_0 - \sigma_m$. Величина σ_m пропорциональна мощности ультразвука, вводимой в расплав. Поэтому металлы, имеющие меньшую величину σ_0 , должны лучше смачиваться ультразвуком при этой же величине вводимой мощности.

В обычном состоянии для расплавленного припоя, находящегося на поверхности неметаллического материала, характерно, что $\sigma_{1,3} > \sigma_{2,3}$, т. е. работа сил когезии значительно превышает работу сил адгезии. Расплавленная навеска припоя в результате действия сил поверхностного натяжения и сил тяжести принимает форму «сидячей» капли, смачивание поверхности при этом отсутствует.

Если в системе припой–паяемый металл введение флюса позволяет увеличить разность $\sigma_{1,3} > \sigma_{2,3}$ и обеспечить смачивание поверхности металла за счет удаления оксидных пленок с нее, то при пайке неметаллических материалов применение флюсов неэффективно, так как не только паяемая поверхность, но и вся масса материала

представляет собой оксидный продукт. При использовании высокотемпературных припоев на основе бинарных сплавов меди и нагреве в вакууме 10^{-3} Па углы смачивания на керамических материалах типа 22ХС не ниже $125\text{--}130^\circ$ [164]. Смачивание пьезокерамики начинается при 1000°C и краевой угол составляет $88\text{--}90^\circ$ [165].

Введение УЗ колебаний в систему расплавленный припой 3–паяемый неметаллический материал 2 с помощью волноводного излучателя 1 (рис. 8.14), интенсифицирует процесс смачивания неметаллического материала. Происходящие при этом изменения в значениях работы сил адгезии и силы смачивания на границе расплавленный припой—паяемый материал отразится на величинах коэффициентов поверхностного натяжения. Анализ экспериментальных данных (рис. 8.15) показал, что сила смачивания на единицу длины периметра смачивания для припоев [33] увеличивается примерно в 5 раз при величине кавитационного давления в припое 1,5–2,0 кПа, что более чем в 6 раз превышает значение коэффициента поверхностного натяжения этих припоев при аналогичных температурах (0,5 Н/м).

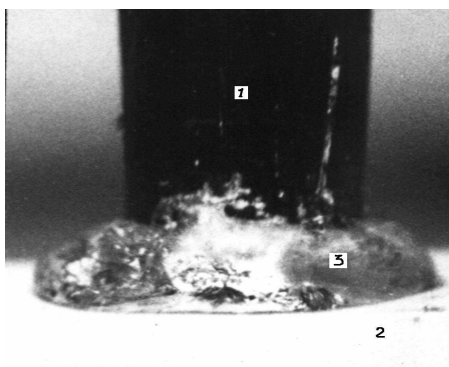


Рис. 8.14. Смачивание поверхности припоем при УЗ активации

Для улучшения смачивания поверхности неметаллических материалов важно также быстрое разрушение газовых пленок, находящихся на поверхности и обладающих всеми свойствами твердого тела в соответствии с теорией граничного слоя А. С. Ахматова [166]. Введение ультразвука в зону контакта жидкого припоя с поверхностью паяемого материала с интенсивностью, превышающей порог кавитации в припое, вызывает образование кавитирующих микрополостей на полупериоде растяжения, которые при захлопывании способствуют разрушению газовых пленок. На

полупериоде сжатия под действием микроударов жидкий припой заполняет эти микрополости, осуществляя смачивание поверхности.

Таким образом, смачивание стеклокерамических материалов в процессе УЗ металлизации достигается за счет удаления газовых пленок и резкого увеличения процессов взаимодействия на границе припой – паяемый материал, что приводит к снижению угла смачивания и растеканию припоя по поверхности материала. Энергия взаимодействия припоя Pb–Sn–Zn–In со стеклокерамикой при угле смачивания 25° , рассчитанная по уравнению Юнга – Дюпре $W = \sigma_{l,2}(1 + \cos\theta)$, составляет 0,95 Н/м, что почти на три порядка превышает энергию дисперсионного взаимодействия при смачивании жидкостями с низким поверхностным натяжением.

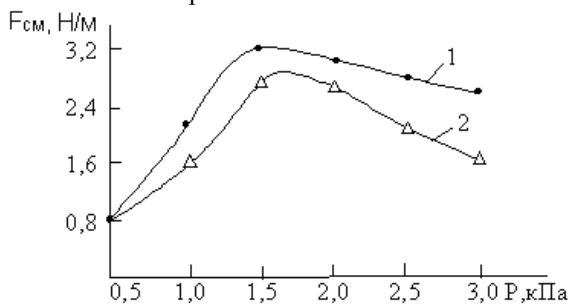


Рис. 8.15. Зависимости силы смачивания на границе припой – стеклокерамика от кавитационного давления в припоях: Pb–Sn–Zn–In (1) и Sn – Zn (2)

Наличие химического взаимодействия при смачивании стеклокерамики припоями в присутствии энергии УЗ поля подтверждается зависимостью степени смачивания от температуры процесса металлизации. При исследовании процесса смачивания сплава АМГ-6 легкоплавкими припоями с температурами плавления ниже 100°C на основе сплава Вуда с добавками металлов Li, Zn, Ga, Ge, In, Pb, Bi, Cd установлено, что температурный порог УЗ лужения находится в пределах $240\text{--}280^\circ\text{C}$. При увеличении мощности УЗ колебаний порог лужения снижается до температуры плавления припоя [167]. Для УЗ металлизации пьезокерамических материалов расплавами чистого олова и припоя ПОС61 установлена зависимость коэффициента смачивания от технологических параметров: времени и температуры расплава. Пороговые значения амплитуды УЗ колебаний составили 15 мкм, а температуры процесса металлизации – 320°C [168].

При исследовании зависимостей прочности сцепления припоев Sn–Zn (П200А) и Pb–Sn–Zn–In от температуры и времени УЗ металлизации стеклокерамики установлено, что смачивание стеклокерамики припоями начинается с 200°C, а оптимальные значения прочности сцепления припоя Pb–Sn–Zn–In со стеклокерамикой 18–19 МПа достигаются в интервале температур 250–270°C и времени 5–7 с, а для припоя П200А – при температуре 320±20°C [169]. Помимо температурного порога, процесс УЗ металлизации характеризуется определенным временным интервалом, зависящим от инерционности процессов физико-химического взаимодействия между припоем и паяемым материалом.

8.4. Диффузия и химическое взаимодействие расплавов с паяемыми материалами

Важнейший процесс, способствующий получению надежных соединений, – диффузия реагирующих компонентов спая. При воздействии УЗ колебаний на жидкости и расплавы металлов происходит интенсификация процесса диффузии в жидком состоянии. Это связано с изменением под действием ультразвука коэффициента диффузии, вязкости среды, а также с появлением микро- и макропотоков в жидкости или расплаве. Основное уравнение, описывающее процесс диффузии в изотропной среде (1-й закон Фика), имеет вид [170]:

$$j = -D \frac{\partial C}{\partial x}, \quad (8.68)$$

где j – плотность диффузионного потока; D – коэффициент диффузии; C – концентрация диффундирующего вещества; x – координата. Если среда анизотропна, то коэффициенты диффузии в различных направлениях неодинаковы. Тогда уравнение (8.68) примет вид:

$$\frac{\partial C}{\partial x} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}. \quad (8.69)$$

Коэффициент диффузии зависит от температуры T [170]:

$$D = D_0 \exp(-Q/RT), \quad (8.70)$$

где D_0 – коэффициент, определяемый типом кристаллической решетки; Q – энергия активации диффузии.

Если на диффундирующие частицы действует внешняя сила F , то под ее влиянием частицы вещества будут двигаться со средней скоростью в направлении действия силы:

$$v = BF, \quad (8.71)$$

где B – подвижность частиц. В этих условиях к потоку диффузии добавится поток частиц, движущихся под действием силы, и тогда полный поток будет равен:

$$j = -D \frac{\partial C}{\partial x} + vC. \quad (8.72)$$

Так как толщина диффузионного слоя в значительной степени зависит от интенсивности перемешивания жидкости вблизи поверхности твердого тела, ускорению диффузионных процессов в УЗ поле во многом способствуют акустические микро- и макропотоки. Скорость микропотоков в вязких средах, например в глицерине, расплаве припоя, не превышает 0,05 м/с, в то время как в водных растворах она равна 1,5–2,0 м/с [136]. Микропотоки способствуют протеканию процессов массообмена в диффузионном слое, особенно на границе расплав твердое тело, а макропотоки – во всем объеме жидкой фазы припоя [171]. Воздействие УЗ поля на припой приводит к уменьшению толщины диффузионного слоя и соответственно к увеличению градиента концентраций на поверхности раздела фаз. Это вызывает увеличение интенсивности диффузии [172]:

$$Z = D \int_s \frac{\partial B}{\partial N} \partial S. \quad (8.73)$$

Интенсивность диффузии зависит от произведения частоты на амплитуду колебаний, возбуждаемых в расплаве, что вызывает нарушение диффузионного граничного слоя, возникающего при гетерогенных процессах. Снижение вязкости оловянно-свинцовых припоев на 9–15% при озвучивании их в течение 10–30 с обусловлено снижением внутреннего трения и диссипацией акустической энергии в расплаве с последующей ее трансформацией в теплоту [143].

Существенное влияние на увеличение скорости диффузии оказывает измельчение зерна припоев, подвергнутых воздействию ультразвука. Для бинарных сплавов типа Sn–Zn, Sn–Bi и других отмечено значительное уменьшение размеров зерна под действием ультразвука, которое в свою очередь зависит от температурного

интервала кристаллизации [172]. Аналогичные исследования показали, что наиболее эффективное измельчение зерна в процессе кристаллизации припоев происходит у припоя П250А, содержащего 20% Zn и имеющего широкий интервал кристаллизации [173]. Измельчение первичных кристаллов в расплаве припоя увеличивает коэффициент диффузии в соответствии с уравнением [174]:

$$D = \frac{1}{3} (A_H^2 W_H + A_B^2 W_B) \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right), \quad (8.74)$$

где A_H , A_B – амплитуды колебаний в жидкости соответственно на нижней W_H и верхней частотах W_B ; ΔE – приращение потенциальной энергии взаимодействия частиц при изменении их концентрации до концентрации насыщения раствора; k – постоянная Больцмана.

Воздействие УЗ колебаний приводит также к усилению диффузионных процессов в твердой фазе, несмотря на отсутствие в ней кавитации и вторичных акустических эффектов. Под влиянием ультразвука происходит снижение энергии активации атомов жидкой фазы, проникновение их в поверхностные слои твердого тела по дислокациям, границам кристаллитов и зерен.

Развитие кавитационного процесса в расплавленном припое, сопровождаемое динамическим и термическим эффектами, увеличивает химическую активность компонентов припоя и создает условия для протекания реакций химического взаимодействия припоя с паяемым неметаллическим материалом. Для образования прочного паяного соединения разнородных материалов, например керамических и стеклокерамических, необходимо протекание процессов физико-химического взаимодействия, результатом которых является образование переходной зоны, содержащей продукты реакции в виде стехиометрических соединений. Прочность связи материалов обуславливается при этом валентными силами [175].

Исследование переходной зоны между припоем и неметаллическим материалом может быть проведено с помощью различных методов анализа, включая металлографический, оптический, рентгеноструктурный, микрорентгеноспектральный, электронно-микроскопический, которые имеют различную разрешающую способность в мкм и позволяют исследовать различные зоны металлизированных диэлектриков и переходную зону "металлизированный слой – материал" (рис. 8.16). Для подтверждения наличия переходной зоны применяют метод исследования

диэлектрических свойств металлизированных образцов, наиболее структурно-чувствительной характеристикой которого является измерение тангенса угла диэлектрических потерь.

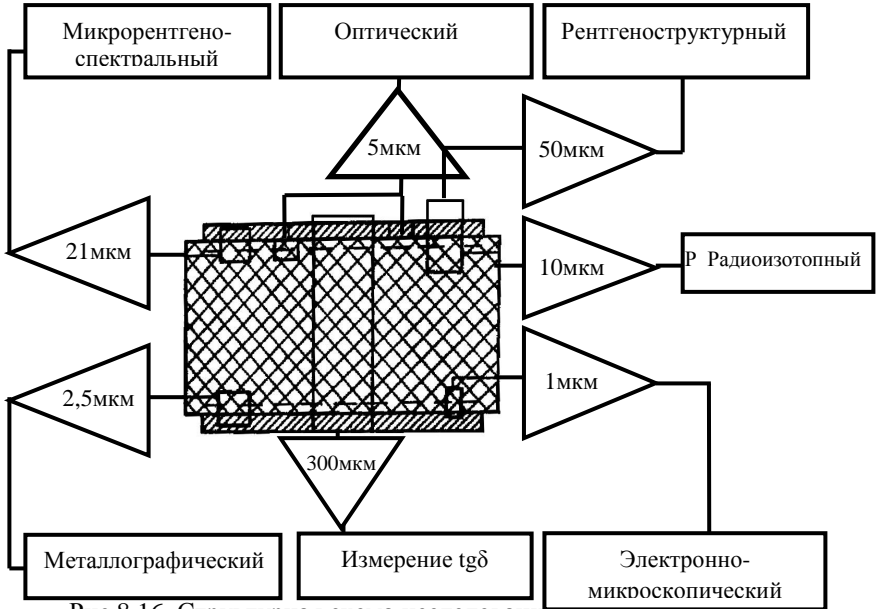


Рис 8.16. Структурная схема исследования переходной зоны в металлизированных диэлектриках

Образцы металлизированных неметаллических материалов можно представить в виде слоистого диэлектрика с последовательным соединением слоев (рис. 8.17). Суммарная емкость образца и его тангенс угла диэлектрических потерь определяются как [175]:

$$C = \frac{C_A C_B}{C_A + C_B}, \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{C_B \operatorname{tg} \delta_A + C_A \operatorname{tg} \delta_B}{C_A + C_B}, \quad (8.75)$$

где C_A , C_B – емкости переходной зоны A и основного материала B ; $\operatorname{tg} \delta_A$, $\operatorname{tg} \delta_B$ – соответственно тангенсы диэлектрических потерь слоев.

С уменьшением толщины металлируемого образца C_B и $\operatorname{tg} \delta$ увеличиваются, а C_A уменьшается. Увеличения ширины переходной зоны и соответственно потерь в зоне приводят к значительному

повышению $tg \delta_A$, а следовательно, и $tg \delta$ всего образца. Поскольку механическим шлифованием и металлизацией удается получить толщину образца порядка 300–350 мкм, разрешающая способность этого метода невысока.

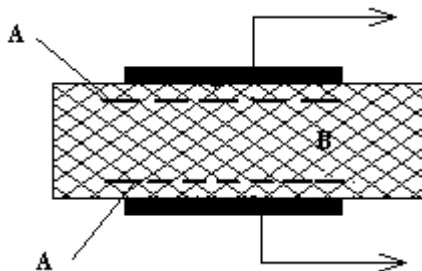


Рис. 8.17. Расположение слоев в металлизированном диэлектрике

Исследованы структуры паяных соединений со стеклокерамическими материалами, в состав которых входило 20–30% стекла в виде группы оксидов SiO_2 , BaO , PbO , включая добавки оксидов Na_2O , K_2O , TiO_2 , а также керамические материалы Т-80, Т-150, Т-260 на основе оксидов $SrTiO_3$, $CaTiO_3$ и TiO_2 [176]. Ультразвуковую металлизацию стеклокерамических образцов осуществляли на лабораторной установке при температуре $270 \pm 5^\circ C$, скорости металлизации 0,3 м/мин на частоте 44 ± 1 кГц и амплитуде колебаний рабочего инструмента 5–8 мкм. В качестве припоя использовался экспериментальный сплав системы $Pb-Sn-Zn-In$ с температурой плавления $180^\circ C$ [177]. Исследования переходной зоны между припоем и стеклокерамикой проводили методами измерения тангенса угла диэлектрических потерь, металлографического, электронно-микроскопического и рентгеноструктурного анализов [178].

Для определения тангенса угла диэлектрических потерь образцы из стеклокерамики шлифовали перед металлизацией до толщин 2,0–0,4 мм. Величины емкости и добротности образцов измеряли на частоте 10 МГц с помощью прибора Е9-4. Тангенс угла диэлектрических потерь рассчитывали по формуле [179]:

$$tg \delta = \frac{C_2(Q_2 - Q_1)}{Q_1 Q_2 (C_2 - C_1)}, \quad (8.76)$$

где C_1 , C_2 – емкости по шкале прибора при подключенном и отключенном образцах; Q_1 , Q_2 – добротности при подключенном и

отключенном образцах.

Анализ полученных экспериментальных данных (табл. 8.2), показывает, что с уменьшением толщины стеклокерамических образцов их емкость изменилась незначительно (на 15%), в то время как $tg\delta$ возрос почти в 2 раза. Такое увеличение может указывать либо на наличие переходной зоны, либо на значительное проникновение припоя в стеклокерамику, что также вызывает изменение ее диэлектрических характеристик.

Металлографические исследования позволяют получить данные о структуре переходной зоны, выявить внутренние дефекты, наблюдать изменение цвета материала, прилегающего к припою, что может свидетельствовать об изменении состава и свойств переходной зоны.

Таблица 8.2

**Емкость и тангенс угла диэлектрических потерь
металлизированных образцов стеклокерамики**

Номер партии	Толщина образца, мм	Емкость, пФ	$tg\delta \cdot 10^{-4}$
1	2,0	80	8,0
2	1,5	82	8,9
3	1,0	90	9,5
4	0,8	91	10,3
5	0,6	91	11,5
6	0,4	92	14,5

Большие преимущества при этом обеспечивают косые аншлифы участков спая, что дополнительно увеличивает разрешение в зоне наблюдения в 10 раз и более. Визуальные наблюдения и фотографирование участков спая, прилегающих к неметаллическому материалу, проводят на металлографических микроскопах типа МИМ-7, ММР-2Р, МИИ-4 и др. Основной трудностью таких исследований является резкое различие в микротвердости соединяемых материалов. Так, в случае пьезокерамики на основе ВаTiO₃ это различие по сравнению с припоем П200А достигает 25 раз.

Спектральный анализ дает возможность обнаружить в спектре неметаллического материала линии компонентов припоя, установив тем самым факт проникновения того или иного компонента припоя в основной материал или растворения основного материала в припое. Путем последовательного сошлифовывания слоев металлизированного

материала можно с точностью по толщине до 10 мкм определить размеры переходной зоны. Данный метод может быть успешно применен для исследования переходных зон спаев стекла с металлами размерами до 250 мкм и более.

Идентификацию интерметаллидных, окисных и других соединений, присутствующих в переходной зоне, можно с достаточной степенью точности осуществить с помощью фазового рентгеноструктурного анализа. Использование дифрактометров типа ДРОН-2 с остророфокусированным рентгеновским излучением повышает разрешающую способность метода до 40–50 мкм.

Анализ зоны спая радиоактивными изотопами (авторадиографический контроль) основан на явлении искусственной радиоактивности. Этот метод позволяет фиксировать радиоактивное излучение изотопов некоторых компонентов припоя, например Fe^{59} , Zn^{65} , и следить за их проникновением в глубь неметаллического материала. Активацию припоя осуществляют потоком нейтронов при его выплавке, что позволяет проводить работу с изотопами, имеющими непродолжительный срок жизни и оказывающими менее вредное воздействие на человека.

Микрорентгеноспектральный метод анализа обеспечивает возможность получения данных о микрохимической структуре переходной зоны и соединяемых материалов. Качественный анализ проводят методом сканирования электронного пучка на заданной поверхности, в результате чего может быть получена информация о распределении элементов, об однородности фаз, о морфологии их распределения. Количественное определение химического состава осуществляется сравнением интенсивности аналитической линии характеристического рентгеновского излучения, генерируемого исследуемым образцом и эталоном известного состава при идентичных условиях возбуждения. В первом приближении отношение регистрируемых интенсивностей прямо пропорционально отношению концентраций искомого элемента в образце и эталоне [180]:

$$C_{обр}^A / C_{эт}^A = (I_{обр}^A / I_{эт}^A)_0, \quad (8.77)$$

где $C_{обр}^A, C_{эт}^A$ – концентрации искомого элемента A в образце и эталоне, мас. %; $I_{обр}^A, I_{эт}^A$ – величины интенсивности линий элемента A на образце и эталоне под углом θ к плоскости объекта.

Серийно выпускаемые приборы, сочетающие в себе растровый электронный микроскоп высокого разрешения и рентгеновский

микроанализатор типов РЭМП-1, РЭМП-2, ЭММА-2 (СССР), Камебакс (Франция), JSM-50A (Япония), ARL (США) имели минимальный размер зонда (около 0,1 мкм). Разрешающая способность при исследовании на этих приборах при количественном анализе равна 2 мкм. Растровый электронный микроскоп Stereoskan-360 (Англия) с микроанализатором AN-10000 позволяет анализировать поверхности размером от 1 мкм² до 0,5 мм².

Наибольшей разрешающей способностью переходной зоны обладает метод электронной микроскопии, позволяющий исследовать тонкую микроструктуру переходной зоны с размером элементов, не превышающим долей микрометра. Для исследования спаев используют угольные или металлические реплики, воспроизводящие рельеф поверхности изучаемого объекта. Электронные микроскопы просвечивающего типа ЭМ5, УЭМВ-100, ЭММА-2 обеспечивали увеличение до 10 000 раз, а Н-800 (Япония) – до 50 000 раз.

Экспериментальные исследования переходной зоны системы пьезокерамика – припой при ультразвуковой металлизации, проведенные с использованием комплекса методов, позволили установить размер и химический состав этой зоны. Так, металлографическими исследованиями спая установлено изменение в цвете зоны пьезокерамики, непосредственно прилегающей к припою. Микрорентгеноспектральный анализ показал, что содержание Zn и Sn в пограничном слое керамики составляет 0,4–1%. Глубина переходной зоны, определенная с помощью радиоизотопного метода, составляет для керамики BaTiO₃ 40 мкм, для керамики (Pb_{0,60}Ba_{0,40})Nb₂O₆–10 мкм. Проникновение металла в пьезокерамику происходит за счет межкристаллитной диффузии. При анализе проб, взятых с поверхности керамики BaTiO₃, обнаружен Ti, с ЦТС-19 – Ti и Zn [181].

Микрорентгеноспектральным анализом исследована структура переходной зоны при металлизации пьезокерамики типа ТБК-3, ЦТБС-3 оловянно-цинковым припоем, содержащим 3–11% цинка. Установлено, что на границе раздела подложка – покрытие формируется переходная область с повышенной микротвердостью, обогащенная цинком, который при содержании 5–7 мас.% сконцентрирован вблизи подложки [182].

Рентгеноструктурный анализ показал наличие фазы Zn₂SiO₄ в системе ЦТБС-3 – припой и ZnTiO₄ в системе титановый сплав ВТ5-1 – припой на границе раздела подложка покрытие. Это подтверждает диффузионную подвижность и реакционную способность цинка в процессе ультразвуковой металлизации пьезокерамических материалов.

Образование химических соединений цинка с оксидами, входящими в состав керамики, обуславливает высокую прочность сцепления припоя, что создает предпосылки для замены процесса высокотемпературного вжигания серебра при формировании электродов к пьезокерамическим элементам металлизацией легкоплавкими припоями.

Металлографический анализ спаев на микроскопе МИМ-8, показал (рис. 8.18, *а*), что на границе припоя со стеклокерамикой наблюдается тонкая зона оксидных соединений, образовавшихся в пограничном слое припоя 1, примыкающем к поверхности стеклокерамики 3. На фотографии микрошлифа отчетливо заметно смачивание частицами индия 2 поверхности стеклокерамики.

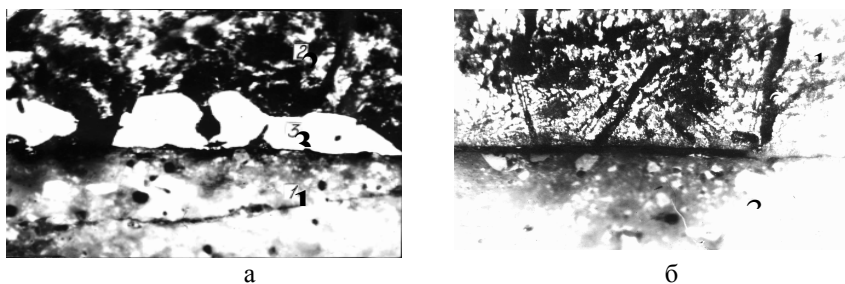


Рис.8.18. Микроструктуры соединений стеклокерамики с припоями: Pb-Sn-Zn-In (*а*) и Sn-Zn (*б*).

Располагаясь вдоль ее поверхности, крупные зерна индия (светлые по виду) смачивают ее поверхность и тем самым увеличивают прочность спая. Однако ярко выраженной зоны диффузии между припоем и стеклокерамикой, а также проникновения припоя в глубь стеклокерамики отмечено не было. Проникновение припоя по трещинам и другим микродефектам имело место в результате структурных несовершенств самой стеклокерамики либо нарушений технологии ультразвуковой металлизации, например, при возникновении жесткого акустического контакта излучающего торца УЗ инструмента с поверхностью материала. При наличии макро- и микротрещин в приповерхностных слоях стеклокерамики припой под действием интенсивных кавитационных давлений заполняет микротрещины и микровпадины, повышая тем самым в некоторой степени прочность сцепления. Однако значительное проникновение припоя в глубь стеклокерамики существенно влияет на ее диэлектрические свойства.

Металлографические исследования зоны спая стеклокерамики с припоем системы Sn–Zn показали (рис. 8.18, б), что вдоль паяемой поверхности наблюдается ориентированное расположение кристаллов цинка 2 под различными углами к поверхности стеклокерамики 3. Отмечена также тонкая зона интерметаллидных соединений, образовавшихся в пограничном слое припоя 1, непосредственно примыкающем к поверхности стеклокерамики [183]. При металлизации стеклокерамики припоем системы Pb–Sn–Zn–In происходят изменения и в ее микроструктуре, заключающиеся в увеличении стеклофазы в пограничной с припоем области, образовании стекловидных областей, располагающихся вблизи границы с припоем (рис. 8.18, а).

Анализ металлокерамического спая с целью определения состава стеклофазы в керамике, объемов стекла и пустот в зависимости от расстояния до межфазной границы металлируемой керамики на основе Al_2O_3 показал, что возле металлируемой зоны наблюдаются увеличение объема стеклофазы и уменьшение объема пустот. Основным компонентом стеклофазы является SiO_2 , содержание CaO и TiO_2 значительно уменьшается на расстояниях до 300 мкм от межфазной границы [184].

Рентгеноструктурный анализ спаев со стеклокерамикой, проведенный на дифрактометре ДРОН-2 с использованием излучения CuK_{α} , позволил выявить некоторые особенности механизма образования спая с материалами, богатыми аморфной фазой. Так, при анализе рентгенограмм исходного металлокерамического материала отмечены рефлексы, соответствующие двойным оксидами $2PbOSiO_2$ и $2BaOSiO_2$, а также уменьшенная интенсивность рефлексов оксида SiO_2 по сравнению с оксидами PbO и BaO. Это указывает на физико-химическое взаимодействие окислов, составляющих аморфную фазу стеклокерамики, в процессе спекания металлокерамической массы при 700–750°C. Анализ припоев в исходном состоянии, применяемых для УЗ металлизации, показал наличие в них оксидов цинка ZnO, образовавшихся в процессе приготовления припоя, а именно при растворении цинка в оловянно–свинцовом припое [183].

На рентгенограммах отмечены рефлексы, соответствующие сложным оксидным соединениям $Pb_2ZnSi_2O_7$ и $BaZnSiO_4$, в то же время относительная интенсивность рефлексов двойных оксидов $2PbOSiO_2$ и $2BaOSiO_2$ была уменьшена по сравнению с интенсивностью, наблюдаемой на рентгенограмме исходного материала (рис. 8.19).

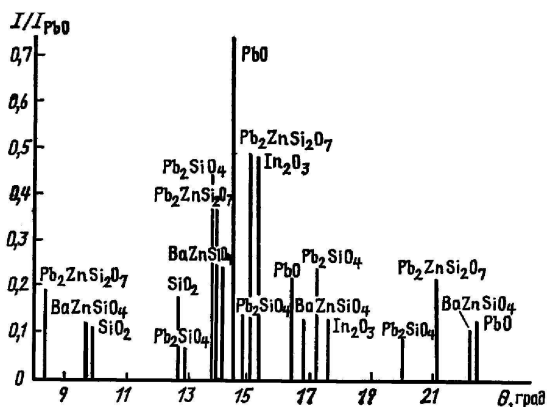


Рис. 8.19. Относительная интенсивность рентгеновских рефлексов оксидов аморфной фазы стеклокерамики и оксидных соединений

Это подтверждает факт химического взаимодействия между компонентами припоя, а именно Zn, с одной стороны, и оксидами аморфной фазы стеклокерамики PbO и BaO – с другой. В рентгенограмме спая припоя системы Pb–Sn–Zn–In со стеклокерамикой обнаружены рефлексы, соответствующие окислу In_2O_3 , что дополнительно свидетельствует об окислительном характере протекающих химических реакций. Исследование микроструктуры переходной зоны на растровом электронном микроскопе MINI–SEM с увеличением в 700 раз (рис. 8.20) показало, размеры зоны сложных оксидных соединений, образовавшихся в припое вблизи границы со стеклокерамикой, не превышают 3 мкм.

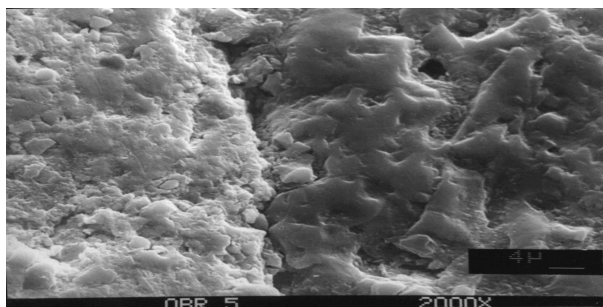


Рис. 8.20. Переходная зона на границе припой – стеклокерамика

Таким образом, металлографические, электронно-микроскопические и рентгеноструктурные исследования позволяют достаточно глубоко исследовать структуру и химический состав переходной зоны в соединениях с керамическими и стеклокерамическими материалами.

8.5. Моделирование процессов диффузии в ультразвуковых полях

Процессы, протекающие при формировании контактных соединений, довольно разнообразны: диффузия, поглощение энергии, физическое и химическое взаимодействие компонентов расплава и т.д. Кинетика этих процессов сложна и определяется в основном характером распределения и взаимодействием дефектов кристаллической решетки типа дислокаций, вакансий и межузельных атомов. Картина еще более усложняется, если процессы протекают под воздействием УЗ поля. Моделирование процессов диффузии позволит получать контактные соединения с заранее прогнозируемыми параметрами, что положительным образом скажется на качестве выпускаемых изделий.

УЗ активация в результате поглощения энергии ускоряет процессы диффузии. Для плоской волны, в которой форма и площадь поверхности волнового фронта не изменяются, интенсивность УЗ энергии определяется как [129]:

$$I = \frac{\rho \cdot c \cdot A^2 \cdot \omega^2}{2}. \quad (8.78)$$

Скорость выделения тепла Q в единичном объеме вследствие поглощения:

$$Q = \chi \cdot I. \quad (8.79)$$

Если из этого объема нет потерь тепла из-за теплопроводности, конвекции или излучения, то

$$Q = \rho \cdot C \cdot \frac{dT}{dt}. \quad (8.80)$$

Устанавливающаяся в состоянии теплового равновесия разность температур между центром хорошо поглощающей сферы радиуса R (T_o) и ее окружением (T_∞) равна:

$$T_o - T_\infty = \frac{QR^2}{2\zeta}. \quad (8.81)$$

Используя уравнение (8.81), получим

$$\Delta T = \frac{\chi \cdot I}{2\zeta} \cdot R^2. \quad (8.81)$$

Для системы, в которой имеются источники тепла мощностью H в единице объема и механизм поглощения Q , получим одномерное уравнение:

$$\frac{d^2 T_1}{dx^2} - \frac{1}{D_1} \cdot \frac{dT_1}{dt} = \frac{1}{\zeta} \cdot [H_1(x) - Q_1(x, T)]. \quad (8.83)$$

Источник тепла, связанный с ультразвуком, испытывает затухание в среде:

$$H_1(x) = I_0 \cdot \chi \cdot e^{-\chi \cdot x}, \quad (8.84)$$

где I_0 - интенсивность звука на поверхности.

Функция Q , определяющая поглощение, зависит от теплопроводности, а значит, и от внешней температуры и от координаты. С хорошим приближением можно записать:

$$Q_i(x, T) = S \cdot (T - T_0) + \left[G \cdot (T - T_0)^2 \right] \cdot f(t), \quad (8.85)$$

где S, G - константы, $f(t)$ - функция времени, учитывающая поглощение.

Для нестационарного состояния, когда концентрация в каждой точке меняется в зависимости от времени, характер распределения диффундирующего вещества описывается 2-м законом Фика [158], в котором температурная зависимость коэффициента диффузии имеет вид:

$$D = D_0 \cdot e^{-\frac{E}{R \cdot T}}, \quad (8.86)$$

где D_0 - предэкспоненциальный множитель, E - энергия активации диффузии, R - газовая постоянная.

Воздействие мощным УЗ полем на расплав увеличивает коэффициент диффузии и активирует процесс зародышеобразования [185]:

$$D' = D_0 \cdot e^{-\frac{E - \Delta E}{R \cdot T}}, \quad (8.87)$$

где ΔE - изменение энергии активации диффузии в УЗ поле.

В начальный момент ($t=0$) твердая фаза не содержит диффундирующего металла, т.е. $C(x, 0)=0$ при $x > h/2$. Граничные условия диффузии: $C(h/2)=C^{T_0}$ и $C(\infty, t)=0$ для всех значений t , то есть на поверхности твердого металла постоянно поддерживается равновесная концентрация диффундирующего элемента, а размеры твердого материала предполагаются достаточно большими, чтобы рассматривать его как полубесконечную среду. При этих условиях решение уравнения

Фика, дающее распределение концентрации диффундирующего элемента в твердой фазе ($x > h/2$), имеет вид [158]:

$$C(x, t) = C^{To} [1 - \operatorname{erf}(z)], \quad (8.88)$$

где

$$z = \frac{x - (h/2)}{2\sqrt{D \cdot t}}. \quad (8.89)$$

Функцию ошибок Гаусса $[1 - \operatorname{erf}(z)]$ определяют из графика в зависимости от величины z и по известному значению C/C^{To} находят $x/2\sqrt{D \cdot t}$. Зная глубину диффузии x и время t вычисляют коэффициент диффузии D или по известным величинам D и C^{To} находят распределение концентрации элемента в диффузионной зоне для любого момента времени.

При контакте твердого тела с жидким расплавом происходит как растворение атомов твердого тела в жидкости, так и обратный процесс [186]. Однако при УЗ активации в сравнительно короткий промежуток времени процесс растворения происходит гораздо быстрее, а отвод растворенного вещества в глубь жидкого расплава более медленно. Учитывая, что растворение происходит за малое, но все же конечное время, определим скорость растворения на этой стадии процесса:

$$\frac{dC}{dt} = K \cdot (C_H - C_0) \cdot \frac{S}{V}, \quad (8.90)$$

где C_H - предельная концентрация насыщенного расплава, S - площадь контакта паяемого тела с расплавом, V - объем расплава, t - время взаимодействия, K - константа скорости истинного растворения.

Решение уравнения (8.88) при начальных условиях ($C=0$ при $t=0$) имеет вид:

$$C = C_H \left[1 - e^{-K \frac{S}{V} t} \right]. \quad (8.91)$$

Если граница контакта рассматривается как плоская торцевая поверхность цилиндра или параллелепипеда, в объеме которого заключен расплав, то

$$C = C_H \left[1 - e^{-\frac{K}{L} t} \right]. \quad (8.92)$$

В этом случае процесс растворения является одномерным для потока частиц:

$$J = K(C_H - C). \quad (8.93)$$

Формулы (8.92) и (8.93) получены в том приближении, что в объеме V все время поддерживается однородное распределение растворимого вещества, т.е. скорость истинного растворения гораздо меньше скорости отвода растворенного от границы и можно считать ее зависящей только от времени, а не от координаты. Массоперенос в жидкости при УЗ активации происходит как за счет диффузии, так и конвективного движения в виде макро и микропотоков, и определяется уравнением конвективной диффузии, которое в однородном случае имеет вид:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D' \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right). \quad (8.94)$$

Обычно концентрационной зависимостью коэффициента диффузии в жидком растворе можно пренебречь и тогда уравнение можно записать:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + D' \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (8.95)$$

где U_x - составляющая скорости конвективного движения по оси x .

Если ввести характерный масштаб длины L рассматриваемого процесса и характерную скорость U_0 конвективного течения, то безразмерная величина $Pe = U_0 L / D$ (число Пекле) определяет доминирующий процесс массопереноса. Если $Pe \gg 1$, то доминирует конвекция, а при $Pe \ll 1$ – диффузия. Соответственно в первом случае в уравнении можно пренебречь вторым членом в правой части, а во втором случае - первым членом. В больших объемах расплавов всегда возможны конвективные течения и конвективное перемешивание.

Если на диффундирующие частицы действует сила УЗ поля F , то под ее влиянием частицы вещества будут двигаться со средней скоростью:

$$U = v \cdot F, \quad (8.96)$$

где v - подвижность частиц.

В этих условиях к потоку диффузии добавится поток частиц, движущихся под действием силы УЗ поля F , и тогда полный поток будет равен [187]:

$$J = -D' \frac{\partial C}{\partial x} + U \cdot C_1 \cos \beta, \quad (8.97)$$

где C_1 - концентрация подвижных частиц, β - угол между векторами силы УЗ поля и диффузионного потока.

Сила УЗ поля, воздействующая на поток частиц сечением S :

$$F = \rho c \cdot \omega A \cdot S . \quad (8.98)$$

Подставляя выражение (8.97) и (8.98) в (8.97) получим:

$$J = -D' \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + v \cdot \rho c \cdot \omega A \cdot S \cdot C_1 \cos \beta . \quad (8.99)$$

Воздействие низкочастотных импульсов электрического тока, пропускаемых через расплав с амплитудой, в 3–5 раз превосходящей амплитуду постоянного электрического тока начала электропереноса, стимулирует диффузию реакционно-активных компонентов в зоне активации. Одновременное воздействие интенсивной кавитации в припое и мощных импульсов тока усиливает направленную диффузию компонентов при формировании соединений. Обусловленный электропереносом суммарный поток ионов реакционно-активных компонентов равен:

$$J_{\text{зн}} = B_u \cdot \rho \cdot \frac{I_a}{\tau} \cdot C_u \cos \alpha , \quad (8.100)$$

где I_a - амплитуда импульсов тока, ρ - удельное электрическое сопротивление компонента, B_u - подвижность иона, τ - скважность импульсов тока, C_u - концентрация ионов реакционно-активного компонента в расплаве, α - угол между векторами электрического поля и диффузионного потока.

Суммарный поток частиц при совместной активации энергией УЗ и электрического полей равен [188]:

$$J = -D' \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + B_u \cdot p \cdot \frac{I_a}{\tau} \cdot C_u \cos \alpha + v \cdot \rho c \cdot \omega A \cdot S \cdot C_1 \cos \beta . \quad (8.101)$$

С учетом теплового эффекта при воздействии энергии активации на систему припой – паяемый материал суммарный поток частиц равен:

$$J = -D_0 \cdot e^{-\frac{E-\Delta E}{R \cdot T}} \cdot C^{T_0} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x - (h/2)}{2 \cdot \sqrt{D_0 \cdot e^{-\frac{E-\Delta E}{R \cdot T}} \cdot t}} \right) \right] + \quad (8.102)$$

$$+ B_u \cdot p \cdot \frac{I_a}{\tau} \cdot C_u \cos \alpha + v \cdot \rho c \cdot \omega A \cdot S \cdot C_1 \cos \beta .$$

Из уравнения (8.102) следует, что активация процессов формирования соединений энергией УЗ поля приводит к росту коэффициента диффузии, а токовая активация - к росту суммарного потока ионов реакционно-активных компонентов в зоне взаимодействия, а следовательно, и к увеличению скорости и глубины

диффузии. Стимулирование процессов диффузии реакционно-активных компонентов в соединении должно приводить к увеличению переходной зоны на границе припой - материал и к образованию химических соединений между компонентами припоя и материалами, что увеличивает механическую прочность, повышает качество паяных соединений и эксплуатационную надежность изделий.

Для моделирования на ЭВМ диффузионных процессов на основании уравнения (8.102) разработана программа на языке C++ версии 2.01 фирмы Borland International. Исходными данными являлись параметры: диффузии (коэффициент диффузии, начальная концентрация, граничная глубина диффузии, время), УЗ активации (амплитуда и частота колебаний, подвижность частиц вещества в УЗ поле, скорость звука в материале, площадь контакта), а также токовой активации (подвижность ионов, удельное электрическое сопротивление реакционно-активных компонентов, концентрация ионов, амплитуда и частота импульсов тока).

Моделировалось влияние УЗ и токовой активации на глубину диффузии припоя Sn-Zn в поверхность алюминиевого сплава АМц при следующих граничных условиях: площадь контактирования 10– 50 мм², амплитуда колебаний 10–20 мкм, скорость звука и плотность алюминиевого сплава 6200 м/с и 2,7·10³ кг/м³, соответственно, амплитуда импульсов тока – 1 – 10 А, частота импульсов 1–10 Гц, граничная глубина диффузии 0–20 мкм, время диффузии 5–15 с, удельное электрическое сопротивление сплава 0,028·10⁻⁶ Ом·м, частота колебаний 22 кГц.

Результаты моделирования показали, что УЗ активация увеличивает концентрацию диффундирующего элемента на граничной глубине в среднем на 15–20%, а совместная УЗ и токовая активации – на 30–45% (рис. 8.21 а, б). С повышением частоты УЗ колебаний наблюдается прирост концентрации, так как при этом увеличивается количество энергии, поглощаемой материалом обрабатываемой детали.

Одновременная активация системы расплав - материалы энергией УЗ поля и мощными импульсами тока увеличивает тепловую энергию системы, что позволяет ускорить достижение температуры пайки, увеличить смачиваемость припоем поверхностей материалов и повысить тем самым производительность процесса.

Практическая проверка результатов моделирования совместного воздействия концентрированных потоков энергии УЗ и ЭМ полей на процессы формирования контактных соединений выполнена для деталей из сплава АМц с использованием припоев ПОС 61 и ПОЦ 10.

Таким образом, совместная активация расплавов энергией УЗ и ЭМ полей увеличивает скорость и глубину диффузии компонентов в переходной зоне, что повышает прочность соединений разнородных по химическому составу материалов в 1,5–1,8 раза и уменьшает переходное электрическое сопротивление в 2,0 – 2,5 раза.

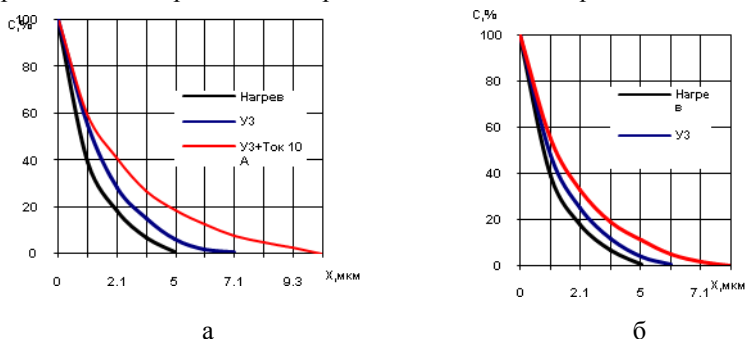


Рис. 8.21. Концентрационные профили диффузии: а - $A = 20$ мкм, б - $A = 10$ мкм

Массоперенос в жидких средах под воздействием УЗ поля связан с проявлением электрокинетического эффекта, который заключается в том, что в УЗ поле увеличивается подвижность носителей заряда в жидкости, возникает их направленный массоперенос в направлении от излучателя под действием давления УЗ волны. При захлопывании кавитационных полостей возможно образование дополнительных носителей - отрицательно заряженных кавитационных пузырьков, которые также участвуют в массопереносе. Поскольку в жидкой среде одновременно находятся заряженные частицы различной концентрации и подвижности, то суммарная плотность потока частиц в единицу времени составит:

$$J_{эн} = \sum_{i=1}^n B_u \cdot C_i \cdot F \quad (8.103)$$

Величина тока, обусловленная возникновением электрического поля в жидкой среде

$$I = \sum_{i=1}^n B_u \cdot C_i \cdot Q_i \cdot F \cdot S, \quad (8.104)$$

где Q_i – заряд иона.

Анализ данных (табл.8.3) показывает, что наибольшее проявление электрокинетического эффекта в виде роста величины постоянного

тока наблюдается у жидкостей с наименьшим электрическим сопротивлением и вязкостью [189]. Время достижения равновесия тока в жидкостях пропорционально ее вязкости. Максимальный эффект увеличения тока отмечен при расстоянии 5 мм между электродами, так как при этом вся зона между электродами занята кавитационными пузырьками. При меньших расстояниях между электродами вследствие микропотоков носители заряда частично выталкиваются из зоны. При расстояниях больше 5 мм электрокинетический эффект в жидкостях ослабевает, так как кавитационная область не захватывает всю зону между электродами.

Таблица 8.3

Характеристики электрокинетического эффекта в жидкостях

Жидкая среда	Электросопротивление, Ом·м	Вязкость, Па·с	Изменение тока ΔI , мА	Время достижения равновесия, с
Масло минеральное	10^{13}	3,2–3,3	0	-
Глицерин	10^{12}	1,5–1,6	0,06	70
Вода дистиллированная	10^3	0,32–0,33	0,6	50
Спирт этиловый	10^4	0,24–0,25	1,4	10
Кислота органическая	10	0,25–0,26	2,0	5
Вода с ионами Cl	0,3	0,32–0,33	3,4	3

Для обнаружения и исследования электрокинетического эффекта УЗ колебания частотой 22 кГц возбуждались в жидких средах с помощью погружного излучателя поршневого типа. Величина постоянного тока, возникающего в жидкости, регистрировалась микроамперметром типа Ф116/1, подключенным между излучателем и электродом из нержавеющей стали, расположенным на дне ванны с исследуемой жидкостью. Наибольшее увеличение величины постоянного тока наблюдалось у жидкостей с наименьшим электрическим сопротивлением и вязкостью, а время достижения равновесия тока в жидкостях пропорционально ее вязкости (рис. 8.22). Максимальный рост тока отмечен при расстоянии 5– мм между электродами так как при этом вся зона между электродами занята кавитационными пузырьками. При меньших расстояниях между электродами вследствие микропотоков носители заряда частично выталкиваются из зоны. При расстояниях больше 7 мм электрокинетический эффект в жидкостях ослабевает в связи с поглощением УЗ энергии и ослаблением потока массопереноса [190].

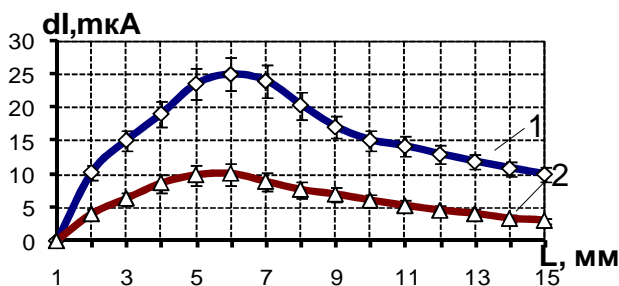


Рис. 8.22. Зависимости изменения тока в жидкости в УЗ поле от расстояния между электродами: 1 - вода с ионами хлора, 2 - органическая кислота

Увеличение тока через жидкость можно объяснить тем, что при подаче УЗ колебаний увеличивается подвижность носителей заряда в жидкости, возникает направленный массоперенос в направлении от излучателя, а при захлопывании кавитационных полостей генерируются дополнительные носители - отрицательно заряженные кавитационные пузырьки. Время достижения максимальной величины тока зависит от амплитуды УЗ колебаний и полярности молекул жидкости. При амплитуде УЗ колебаний до 5 мкм создаваемые микропотоки недостаточны для создания необходимой подвижности ионам и процесс роста тока растянут по времени. При амплитуде 7–8 мкм время достижения максимума тока сокращается, а его значение увеличивается, так как максимальное количество ионов участвуют в массопереносе. При амплитудах более 10 мкм время достижения экстремума тока минимально, а амплитуда его падает в связи с рассеивающим действием кавитационного облака на направленность потока ионов.

Для проверки гипотезы о полярности ионов, участвующих в образовании тока вблизи излучателя расположили третий электрод в виде сетки, на который подавали постоянное напряжение 400–500 мВ от внешнего источника. Характер изменения тока во времени зависел от потенциала «сетки». При положительном потенциале на сетчатом электроде величина тока возрастала в среднем в 3 раза. При отрицательном потенциале ток менял направление и падал по амплитуде, что объясняется тем, что в переносе зарядов участвуют в основном положительные ионы, находящиеся в жидкой среде.

Исследование УЗ воздействия на слабо ионизированные жидкости

(жидкое стекло) показало, что при подаче потенциала на излучатель увеличивается значение тока между электродами на 20%, а максимум тока достигается за время, равное 130 с. После внесения микрочастиц цинка, которые в процессе УЗ активации приобретают положительный заряд, амплитуда тока через жидкость возросла в 1,6 раза. При использовании муравьиного спирта, содержащего отрицательные ионы ОН, начальный уровень тока ниже в 3 раза, амплитуда тока при этом имеет более выраженный экстремум. В металлических расплавах ввиду высокой электропроводности и отсутствия свободных носителей заряда не удалось выявить электрокинетический эффект, однако зарегистрировано изменение тока.

Для повышения эффективности УЗ активации и увеличения интенсивности кавитационных процессов в жидкой среде предложено за счет внешнего электрического поля пропускать электрический ток плотностью 10–100 А/м² от УЗ излучателя к детали или контактному элементу на изделии. Под действием постоянного электрического тока в полярной жидкости ускоряется массоперенос ионов, происходит восстановление ионов водорода в виде газовых пузырьков размером 50–100 мкм, которые являются зародышами кавитации. Непрерывное накопление зародышей кавитации в рабочей зоне и их захлопывание под действием УЗ колебаний увеличивает интенсивность кавитационных процессов, что ускоряет процесс разрушения жировых пленок на поверхности детали и повышает качество очистки за счет более равномерного распределения зародышей кавитации по всей поверхности под действием силовых линий тока [191].

Для повышения локальности и производительности активации электрическое поле ориентируют таким образом, чтобы ионы водорода устремлялись к излучателю и восстанавливались в виде газовых пузырьков. Вблизи поверхности излучателя ввиду значительных амплитуд колебаний происходит быстрый рост пузырьков до критических размеров и их захлопывание, что сопровождается интенсивными кавитационными явлениями. Величина пропускаемого тока через жидкость зависит от степени ее полярности, размеров обрабатываемой детали. Наибольшее увеличение кавитационного давления в 2–2,5 раза, измеренного с помощью кавитометра отмечено при оптимальной плотности тока 10–100 А/м².

Схемы совместного воздействия УЗ и электрического полей для металлических (а) и неметаллических материалов (б) приведены на рис. 8.23. Изделие 1 погружают в жидкость на расстояние h от дна ванны 2 и с помощью провода подключают к одному из полюсов внешнего

источника тока 3. Другой полюс источника соединяют с ванной. При подаче электрических колебаний от УЗ генератора на преобразователь 4 в нем возбуждаются механические колебания, которые через излучатель 5 диафрагменного типа передаются в ванну. Под действием постоянного электрического тока в жидкости происходит перемещение ионов водорода в направлении от излучателя к изделию, их восстановление, образование газовых зародышей, что ускоряет процесс кавитации.

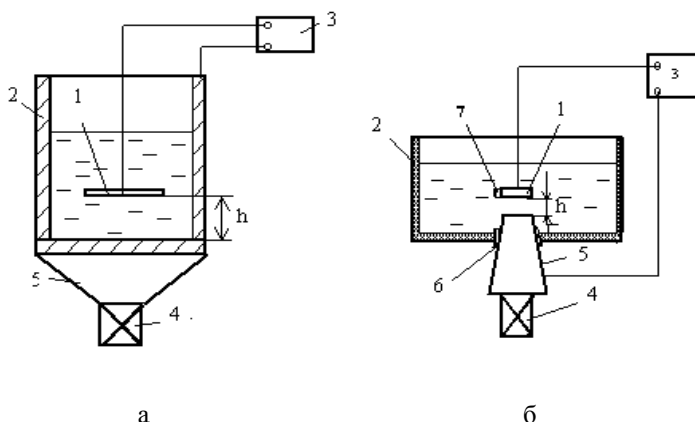


Рис. 8.23. Схемы совместной активации энергией УЗ и электрических полей

При локальном вводе УЗ колебаний в ванну изделие 1 размещается в ванне 2 на расстоянии h от рабочего торца излучателя. Неметаллическая ванна 2 имеет в основании отверстие, в котором закреплен излучатель типа конденсатор с помощью уплотнения 6. Контактное кольцо 7 подключается к одному из полюсов внешнего источника 3, а другой полюс соединен с излучателем 5. При возбуждении в преобразователе 4 механических колебаний они усиливаются излучателем и передаются в жидкую среду. Это значительно повышает интенсивность кавитационных явлений за счет осаждения зародышей кавитации на обрабатываемом изделии и локального ввода УЗ колебаний.

Выбор плотности электрического тока, пропускаемого через жидкую среду, в диапазоне $10 - 100 \text{ A/m}^2$ обусловлен необходимостью эффективного перемещения газовых зародышей кавитации в зону обработки и увеличения кавитационного давления при их захлопывании. При плотности тока менее 10 A/m^2 количество

перемещаемых ионов водорода недостаточно для ускорения процесса кавитации, при плотности тока более 100 А/м^2 количество зародышей кавитации возрастает в значительной степени, что приводит к их слиянию в более крупные газовые полости, которые при амплитудах колебаний 10–15 мкм не захлопываются, а всплывают на поверхность.

При совместном действии УЗ и электрических полей на расплавы возникновение процесса электродиффузии обусловлено соотношением действующих на термически возбужденный ион металла сил, направленных навстречу электрическому потоку (действие приложенного внешнего поля), и по направлению электронного потока («электронный ветер»). Вследствие экранирующего влияния электронов влияние электрического поля невелико, поэтому преобладающей является сила «электронного ветра», которая возрастает с увеличением плотности тока. В результате возбужденные ионы имеют большую вероятность перейти в вакансию по движению электронов, чем против движения. Таким образом, вакансии перемещаются к отрицательному полюсу, а ионы металла - к положительному, увеличивая тем самым ширину диффузионной зоны

Направленная диффузия компонентов припоя или компонентов материалов соединения в припой за счет электромиграции частиц диффузионно-подвижных металлов при плотностях тока, больших $1\text{--}1,5 \text{ А/мм}^2$ [192], должна приводить к увеличению ширины диффузионной зоны и прочности соединений. При исследованиях совместного действия энергии УЗ поля и электрического тока на расплавы и на прочность соединений величина постоянного тока, пропускаемого через расплав, изменялась в пределах 0–15 А и контролировалась прибором М2020 с точностью 0,5 мА, включенном в электрическую цепь с дополнительным шунтом. УЗ колебания в расплав подавали через 20–30 с после начала пропускания тока для устранения погрешности измерений из-за разогрева проводов и балластного резистора.

При величинах токов до 10 А за счет микропотоков и кавитационных явлений в расплаве нарушался ближний порядок частиц, что увеличивало его сопротивление и, соответственно, уменьшало ток через расплав на 50–80 мА (рис. 8.24). При токе свыше 10 А возникал значительный массоперенос носителей заряда и их упорядоченное перемещение между электродами, что при амплитуде 15 мкм увеличивало ток через расплав до 100 мА. При величине тока более 12 А припой интенсивно разогревался, что приводило к увеличению его

сопротивления и, следовательно, к снижению изменения тока через расплав [189].

Прочность соединений припоем ПОС 61 с алюминиевыми образцами от величины постоянного тока, пропускаемого в направлении от излучателя к детали при частоте 22 кГц, амплитуде 10 мкм, температуре 240 °С, времени 10 увеличивается для значений тока, больших 10 А, и снижается при токах свыше 15 А (рис.8.25).

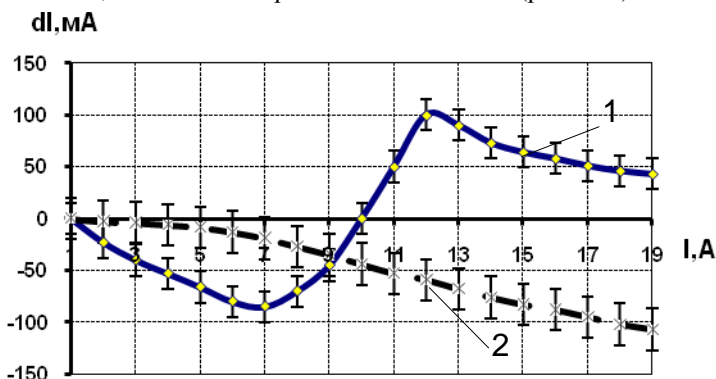


Рис. 8.24. Зависимости изменения тока в расплаве при УЗ активации от величины тока и амплитуды колебаний: 1 - $A = 5 \text{ мкм}$, 2 - $A = 15 \text{ мкм}$

Вероятной причиной увеличения прочности является электрическая стимуляция процесса диффузии компонентов припоя в материал детали, которая может быть связана с явлением электропереноса в расплавах припоя при высоких плотностях тока.

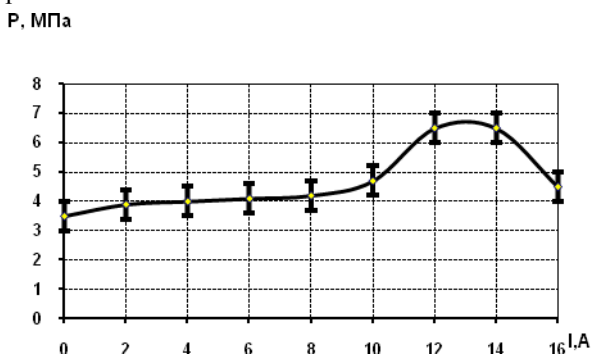


Рис. 8.25. Зависимость прочности соединений от величины тока

Исследование прочности соединений от времени совместного воздействия УЗ колебаний и токовой активации при различных направлениях УЗ колебаний (рис. 8.26) показало, что в случае параллельных колебаний она выше на 10-15 МПа, чем при продольных. Максимальная прочность соединений наблюдалась при длительности воздействия параллельных УЗ колебаний 15–20 с и составляла 24 МПа. При меньшем времени не успевают разрушиться окисные пленки и плохое смачивание поверхности вывода, при большем - прочности снижается за счет эрозии паяемого материала и окисления припоя.

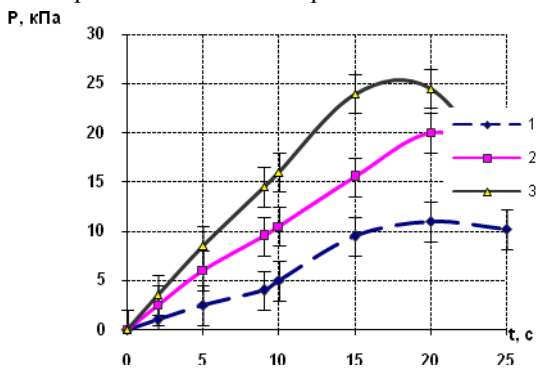


Рис. 8.26. Зависимости прочности соединений от времени и вида колебаний: 1 - продольные, 2 - продольные в электрическом поле, 3 – параллельные

Пропускание тока через зону взаимодействия в направлении от припоя к основанию повышает прочность соединений в 1,5–1,8 раза за счет увеличения ширины диффузионной зоны из-за электромиграции алюминия в припой. Ширина диффузионной зоны, измеренная с помощью растрового электронного микроскопа, в этом случае составляла около 4 мкм для припоев ПОЦ 10 и ПОС 61 (рис. 8.27).

При пропускании тока в обратном направлении прочность соединений практически не увеличилась, так как олово и свинец, составляющие припой, не обладают такой подвижностью, как алюминий. Ширина диффузионной зоны при этом была практически такой же, как и в случае стимуляции процесса металлизации без токовой активации и составляла около 2 мкм. Для припоя ПОЦ 10 диффузионная зона несколько больше из-за миграции электроподвижного цинка к границе алюминий-припой и далее вглубь алюминиевой детали, увеличивая ширину диффузионной зоны.

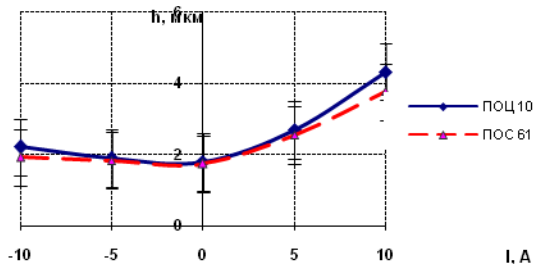


Рис. 8.27. Зависимости ширины переходной зоны от направления и величины тока

Структуры соединений, сформированных в УЗ поле (а) и при совместном действии УЗ и электрического поля (б), приведены на рис. 8.28. В первом случае наблюдается равномерное смачивание поверхности основного металла – Al, однако заметного растворения Al не отмечено.

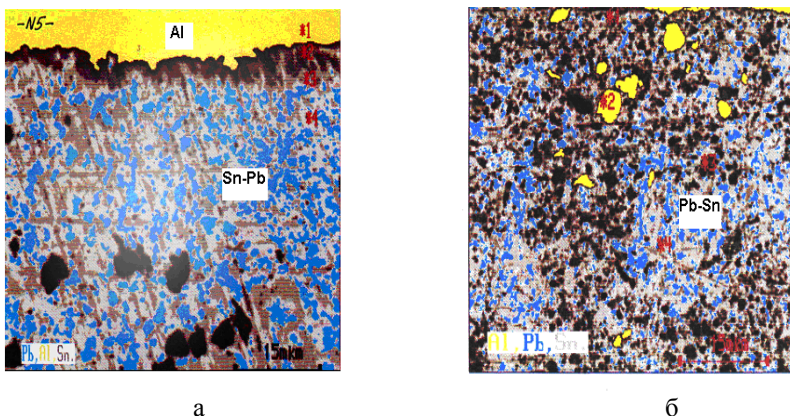


Рис. 8.28. Микроструктуры паяных соединений с алюминием

Во втором случае наблюдается более глубокая диффузия алюминия в расплав оловянно-свинцового припоя, что сопровождается расширением переходной зоны на границе расплав–основной металл.

8.6. Оборудование и инструменты для ультразвуковой пайки и металлизации

В первых научно-исследовательских работах по УЗ пайке в качестве источника УЗ колебаний при пайке алюминия и его сплавов использовались специальные УЗ паяльники, в которых рабочая часть волновода, погруженного в припой, колебалась с частотой 16–22 кГц. Поскольку зона активной кавитации находилась в непосредственной близости от вибрирующего конца волновода, при лужении необходимо было перемещать паяльник вдоль поверхности.

Как показали исследования процесса УЗ пайки, интенсивность кавитации увеличивается в низкочастотной области спектра УЗ колебаний. С повышением частоты колебаний интенсивность кавитации в расплаве снижается, одновременно возрастают электромагнитные и магнитомеханические потери в преобразователях ультразвука. Уход частоты в область слышимых звуков повышает уровень шума, усложняет звукоизоляцию установок. Оптимальный частотный диапазон работы ультразвуковых технологических установок 18–44 кГц [193]. К факторам, обуславливающим эффективность ультразвуковой кавитации, в первую очередь относится мощность УЗ излучения, вводимого в расплав припоя, которая должна быть в пределах 100 Вт, и точная настройка УЗ инструмента на его собственную частоту. Время пайки или лужения составляет 5–10 с, скорость перемещения излучателя паяльника – $(0,8–1,6) \cdot 10^{-2}$ м/с, а оптимальная величина зазора между торцом излучателя и паяемой поверхностью – 0,2–3,0 мм [194]. Необходимость постоянного поддержания этого зазора вызвана стремлением исключить образование макро- и микротрещин в поверхностных слоях хрупких неметаллических материалов при их УЗ лужении за счет динамического фактора ультразвука, особенно в результате возникновения жесткого акустического контакта излучателя с обрабатываемой поверхностью. Снижение динамического воздействия УЗ вибраций на паяемый материал достигается путем изменения угла ввода колебаний с 90 до 30–40° или применения колебаний, параллельных паяемой поверхности.

Первые ультразвуковые паяльники отечественные (УП-21, УП-42), зарубежных фирм Milliard (Англия) и других были рассчитаны на питание от ультразвуковых генераторов с выходной мощностью, не превышающей 50 Вт. Паяльники имели низкую акустическую мощность, перегревались при высокотемпературной металлизации

(450—700°С), вследствие чего снижался коэффициент магнитострикции преобразователей [195, 196]. Промышленностью в 70–80 годы выпускались УЗ паяльники УЗП2–0,025 и ванны лужения УЗВЛ–0,4; УЗВЛ–1, источником УЗ энергии для которых служит генератор типа УЗГ3–0,4 с максимальной выходной мощностью 400 Вт. Характеристики УЗ серийно выпускаемого технологического оснащения в сравнении с ранее выпускавшимися моделями [197,198] приведены в табл. 8.4, характеристики УЗ генераторов – в табл. 8.5.



Рис.8.29. Рабочее место УЗ пайки паяльником

Рабочее место УЗ пайки с помощью паяльника приведено на рис. 8.29, внешний вид УЗ паяльника с измерителем вибраций на рис 8.30.



Рис. 8.30. УЗ паяльник типа УЗП2–0,025

В процессе практического использования паяльников типа УЗП2–

0,025 выявлены такие их недостатки, как нестабильность режима работы, неэффективность воздушного охлаждения, малая мощность нагревателя, низкая производительность ручного труда. Ваннам лужения УЗВЛ-0,4 присущи недостатки: низкая интенсивность колебаний, что приводит к наличию необлуженных мест; ограниченные размеры рабочей поверхности припоя; загрязнение ванны окислами припоя и шлака; наличие водяного охлаждения преобразователя. Снижение температуры нагрева преобразователя в ультразвуковых паяльниках достигается путем снабжения волновода воздушным радиатором [199], профилирования пластин преобразователя и сборки в пакет с заданным воздушным зазором [200], а также расположения ребер охлаждения на волноводе [201].

Повышение стабильности режимов работы магнитострикционных преобразователей в УЗ технологическом оборудовании достигают автоматической подстройкой генератора сигналом, снимаемым со вспомогательной обмотки в сочетании с дополнительным переманчиванием преобразователя на инфразвуковой частоте в диапазоне 0,01–200 Гц [202]. Мощность нагревателя увеличивают путем использования газовой горелки, расположенной в корпусе УЗ паяльника и выступающей над торцом волновода, что дает возможность производить УЗ пайку среднеплавкими и припоями.

Весьма важно при УЗ пайке правильное дозирование припоя. С этой целью разработан ряд конструкций паяльников с дозированием припоя. На рис. 8.31 изображена схема УЗ паяльника с дозирующим устройством, использующим УЗ капиллярный эффект. Паяльник содержит камеру для припоя 2, которая нагревается нагревателем 4. Дно камеры соединено с капиллярной трубкой 3. Паяльник снабжен излучателем ультразвука 1, размещенным вблизи торца трубки, при этом зазор между торцами излучателя и трубки регулируется [203]. При внутреннем диаметре трубки 0,1—1,0 мм припой под действием ультразвука прокачивается через нее в направлении от излучателя к месту пайки. Скорость подачи регулируется от 0 до 7 г/с изменением амплитуды колебаний и величины зазора между торцом трубки и излучателем. Для дозированной подачи припоя при УЗ пайке и увеличения производительности процесса создан УЗ паяльник, содержащий дозирующую емкость 1, волновод 2, преобразователь 4, согласующий элемент 3 (рис. 8.32).

Таблица 8.4

Технологическое оснащение для УЗ пайки и металлизации

Модель	Частота, кГц	Мощность, Вт		Габаритные размеры, мм
		нагревателя	потребляемая	
Паяльники				
УП-21	23—26	70—120	100—150	260x230x45
УЗП-1	22	--	250	370x170x50
УЗУП-2	23—28	70—120	110—160	280x40x150
УЗП2-0,025	44	35	60	255x57x152
Ванны				
УП-40	22	1000	1500	430x360x220
УЗВА-1	18-25	300	800	360x360x480
УЗУЛ-1М	23-25	300	500	200x300x250
УЗВЛ-1-0,4/22	18-25	300	800	360x360x480
УВЛ-4	18	1000	1300	309x367x360
УЗВЛ1-0,1/22	22		2300	Объём ванны 5,0 л

Таблица 8.5

Ультразвуковые генераторы

Тип	Конструктивное исполнение, нагрузка	Мощность, кВт	Частота, кГц	Цена, (у.е)
УЗГ1-0,063/22	АПЧ,ПП	0,063	22	95
УЗГ2-0,063	АПЧ,ИА,ПП			150
УЗГ13-0,1/22	АПЧ,АСА,ИА,ПРМ,ПП	0,1		275
УЗГ14-0,16/22	АПЧ,ИА,СРМ,ПП			200
УЗГ7-0,25/22		0,25		675
УЗГ7-0,4/44	АПЧ,АСА,ИА,ПРМ, ВПО,МП,ИП	0,4		1500
УЗГ8-0,4/22	АПЧ,ИА,СРМ,МП,ИП			665
УЗГ3-1,0/22		0,1		1200
УЗГ15-1,6/22	АПЧ,АСА,ИА,ПРМ,ВПО,М П,ИП	1,6		2000
УЗГ16- 1,6/22М	АПЧ,ИА,СРМ,ВПО,МП,ИП			1400
УЗГ16-1,6/22П	АПЧ,ИА,СРМ,ВПО,ПП		1300	
УЗГ5-4,0/16	ИА,СРМ,ВПО,МП,ИП	4,0	16	4000
УЗГ4-25,0/16	ВО,ВПО,МП,ИП	25,0		11000

АПЧ–автоматическая подстройка частоты, АСА–автоматическая стабилизация амплитуды, ИА–индикатор амплитуды, ПРМ–плавная регулировка мощности, СРМ–ступенчатая регулировка мощности, ВО – водяное охлаждение, ВПО–воздушное принудительное охлаждение, ПП– пьезокерамический преобразователь, МП–магнитоstrictionный преобразователь, ИП – источник тока подмагничивания

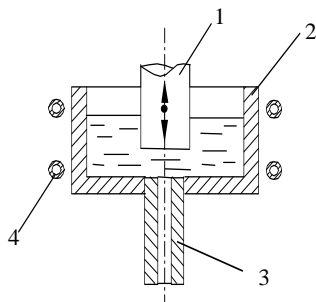


Рис. 8.31. УЗ паяльник с дозирующим устройством: 1 – излучатель, 2 – камера для припоя, 3 – капиллярная трубка, 4 –нагреватель

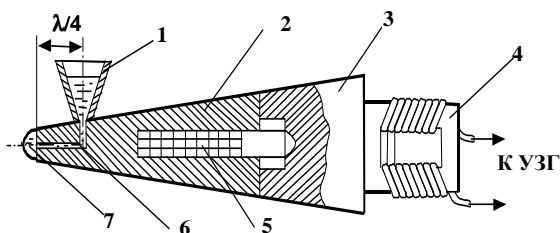


Рис. 8.32. УЗ паяльник с дозированием припоя: 1 – емкость, 2 – волновод, 3 – согласующий элемент, 4 – преобразователь, 5 – нагреватель, 6 – капиллярные отверстия, 7 – наконечник

Емкость для припоя жестко связана с волноводом на расстоянии не более $\lambda/4$ от его рабочего торца. Диаметр капиллярных отверстий 6, соединяющих емкость с рабочей поверхностью наконечника, выбирается таким образом, чтобы в обычном состоянии припой удерживался в емкости за счет сил поверхностного натяжения [204]. При возбуждении УЗ вибраций магнитоstrictionным преобразователем в наконечнике возникает УЗ капиллярный эффект, заключающийся в резком снижении поверхностного натяжения припоя и увеличении скорости течения припоя по капиллярам. В результате

припой непрерывно подается из дозирующей емкости по капиллярным отверстиям на рабочую поверхность наконечника 7.

Для УЗ пайки изделий с дозированной подачей припоя разработано устройство, содержащее камеру для припоя с размещенными в ней полым стержнем и установленным оппозитно нерабочему торцу стержня излучателем акустических колебаний. Излучатель выполнен с фигурным фланцем, расположенным на расстоянии $\lambda/2$ от его рабочего торца, жестко соединенным по периметру с камерой для припоя, а длина полого стержня составляет не более $\lambda/8$ [205]. Конфигурация поверхности фланца одновременно обеспечивает равномерную передачу УЗ колебаний от излучателя на камеру припоя, а от нее на полый стержень, а также пополнение уровня расплава припоя в ванне через окна, образованные при жестком закреплении фланца с камерой. Между фигурным фланцем и камерой выполнен надежный акустический контакт пайкой тугоплавким серебросодержащим припоем (рис.8.33,а).

Фигурный фланец может быть изготовлен заодно с излучателем или жестко соединен с ним пайкой на расстоянии $\lambda/2$ от рабочего торца излучателя. При этом пучность УЗ колебаний находится в точке соединения фланца с камерой, что позволяет без потерь передать часть колебаний от излучателя камере припоя и далее полному стержню, жестко соединенному с камерой. Для повышения стабильности процесса пайки длина полого стержня должна быть не более $\lambda/8$, что обеспечивает одновременно эффективный ввод УЗ колебаний в зону пайки и подачу припоя на паяемые детали.

Устройство содержит магнитострикционный преобразователь 1, трансформатор 2 упругих колебаний, излучатель 3, который через фигурный фланец 4 жестко соединен с камерой 5 для припоя. В свою очередь полый стержень 6 жестко соединен с камерой для припоя, а рабочий торец излучателя погружен в расплав припоя и находится на расстоянии 0,1–1,0 мм от нерабочего торца полого стержня. Припой разогревают до полного расплавления в камере, затем подают УЗ колебания от магнитострикционного преобразователя через трансформатор акустических колебаний излучателю. Упругие колебания УЗ частоты вводят в припой, вызывая истечение его из полого стержня 6, а также за счет с помощью фигурного фланца 4 сообщаются через камеру припоя полному стержню и от него передаются деталям. Одновременный ввод УЗ колебаний в расплав припоя и подача их на полый паяльник стержень обеспечивает передачу паяемым деталям УЗ энергии, достаточной для эффективного разрушения

окисных пленок на паяемых деталях. Фигурная форма фланца позволяет вести непрерывно процесс пайки или лужения, пополняя через вырезки во фланце объем припоя в камере.

В устройстве УЗ пайки телескопических соединений (рис. 8.33,б) [206] ванночка с припоем выполнена разъемной, одна половина ее жестко связана с волноводом, а другая – с отражателем и образует при смыкании единую акустическую систему. Устройство включает отражатель 1, полуформы 2, жестко соединенные с волноводом 3. В свою очередь волновод соединен через акустический трансформатор 4 с преобразователем УЗ колебаний 5 магнитострикционного типа. Паяемые участки труб 6 фиксируются оправкой в строго вертикальном положении. Центр ванночки находится на расстоянии, $\lambda/4$ от плоскости отражателя. Возбуждаемые упругие механические колебания в единой акустической системе образуют с помощью отражателя в режиме стоячей волны пучность колебаний в зоне пайки соединения. Благодаря разъемному выполнению ванночки повышается производительность труда при пайке за счет облегчения процесса сборки деталей и съема их после пайки. Режим стоячей волны обеспечивается при размещении центра ванночки на расстоянии $\lambda/4$ от плоскости отражателя. Устройство предназначено для пайки телескопических соединений и может быть использовано в приборостроении, машиностроении и газовой промышленности.

Для пайки алюминиевых телескопических соединений, работающих в условиях знакопеременных и вибрационных нагрузок, разработана УЗ ванна с локальным вводом УЗ колебаний в припой и созданием микроволны припоя [207]. Для снижения количества энергии УЗ колебаний, передаваемой на стенки ванны 1, использована фторопластовая развязка 2 концентратора 3 с ванной лужения (рис.8.34). Это позволило повысить интенсивность колебаний в зоне погружения деталей, снизить шлакообразование и уменьшить потребляемую мощность от источника ультразвука.

Недостатками применения ручного УЗ паяльника в процессах пайки и металлизации являются: невозможность определения оптимальной величины удельной акустической мощности, вводимой в расплав; отсутствие точного контроля времени металлизации; трудности поддержания наиболее эффективного угла наклона излучателя к паяемой поверхности в процессе работы. Эти недостатки вызывают значительный разброс в свойствах паяных соединений, а именно прочности сцепления припоя, что затрудняет использование процесса УЗ металлизации в промышленности.

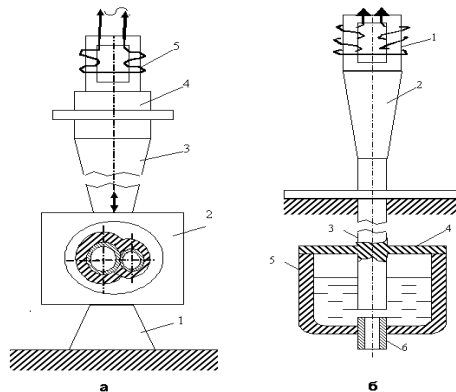


Рис. 8.33. Схемы УЗ устройств пайки телескопических соединений (а) и с дозированием припоя (б)

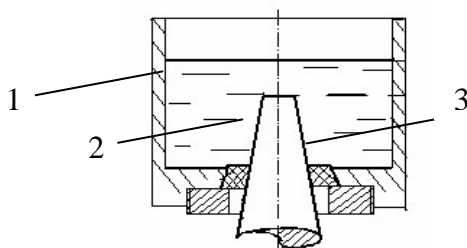


Рис. 8.34. Схема УЗ ванны с фторопластовой развязкой

Генерирование упругих механических колебаний УЗ частоты в технологических установках, предназначенных для пайки, может осуществляться магнитострикционными, пьезокерамическими или ферритовыми преобразователями. Для использования в процессах УЗ пайки и лужения преобразователи встраиваются в ванны и паяльники, излучающие поверхности которых изготавливаются из кавитационно-стойких материалов (нержавеющие стали, титановые сплавы). Электрическая мощность современных промышленных установок для УЗ пайки не превышает 0,4—2,5 кВт.

В настоящее время применяются два основных способа УЗ пайки [197]: с возбуждением всей массы припоя в ванне (рис. 8.35, а) и с локальным воздействием ультразвука на ограниченный объем жидкого припоя (рис. 8.35, б). При первом способе обрабатываемое изделие 3 погружается в ванну жидкого припоя 4, корпус которой же-

ство связан с волноводом или концентратором 2 и преобразователем 1, охлаждаемым проточной водой.

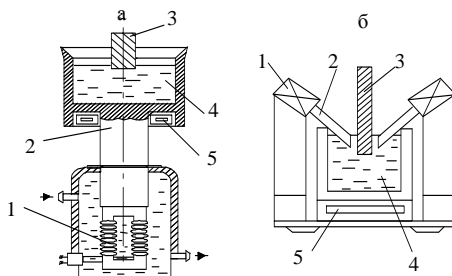


Рис. 8.35. Конструкции УЗ ванн с возбуждением всей массы припоя (а) и ограниченного объема припоя (б): 1 – источник ультразвука, 2 – волновод; 3 – изделие; 4 – ванна с припоем; 5 – нагреватель

При втором способе изделие 3 погружается в ванну жидкого припоя 4. При этом источники ультразвука 1 не соединяются с ванной, а посредством волноводов 2 подают УЗ энергию непосредственно в области, подверженные металлизации. В обеих конструкциях ванн расплавление припоя осуществляется нагревателем 5.

Первый способ обеспечивает возможность обработки мало- и среднегабаритных деталей или одновременно партии деталей. Однако при этом не всегда удается получить необходимую интенсивность ультразвукового воздействия по всей паяемой поверхности. Второй способ позволяет паять и крупногабаритные изделия. Достоинством способа является возможность концентрации ультразвуковой энергии в необходимых областях при достаточно высокой степени равномерности ее распределения, недостатком — снижение ресурса работы излучателей ввиду их кавитационной эрозии.

Усовершенствование серийно выпускаемых ванн лужения УЗВЛ-0,4, выразившееся в применении конического концентратора УЗ колебаний с коэффициентом трансформации 2,5 в качестве элемента, обеспечивающего передачу колебаний от магнитострикционного преобразователя к ванне, позволило увеличить интенсивность УЗ колебаний в ванне в 1,5 раза, снизить теплопередачу от нагревателя ванны. Для поддержания температуры припоя на заданном уровне был применен блок измерения и регулирования температуры, состоящий из прибора М303К, термопары ХК, и силового реле типа МКУ. Охлаждение магнитострикционного преобразователя осуществлялось

вентилятором мощностью 3,5 Вт, обеспечивающим скорость воздушного потока 2м/с [208] (рис. 8.36).

Наибольшую эффективность и равномерность распределения УЗ поля обеспечивают УЗ ванны с круглым и фасонным профилем дна (рис. 8.37). Такие ванны позволяют применить большое количество преобразователей (до 48 шт.) и равномерное распределение интенсивности УЗ энергии, что способствует однородному и равномерному развитию кавитации по сравнению с обычными ваннами, и следовательно, повышает производительность процесса и качество лужения изделия [209].



Рис. 8.36. УЗ ванна лужения труднопаяемых металлов

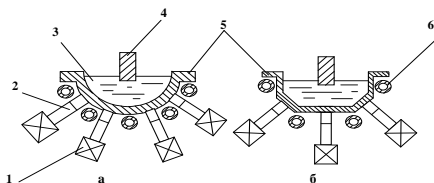


Рис. 8.37. УЗ ванны лужения с круглым (а) и фасонным (б) профилем дна: 1 – преобразователь, 2 – волновод, 3 – припой, 4 – изделие, 5 – корпус, 6 - нагреватель

Активацию небольшого объема припоя в ванне 8 осуществляют с помощью консольно закрепленного пластинчатого волновода 3, на который через волноводы 4 и 5 подают от УЗ преобразователя колебания (рис. 8.38,а). В свободном конце пластинчатого волновода в отверстии закреплен трубчатый излучатель ультразвука 1, погруженный в припой. Таким образом, возбуждаемые продольные УЗ колебания посредством волноводов 3, 4, 5 преобразуются в поперечные колебания.

Сотовая паяльная ванна состоит из двух преобразователей 1 и большого количества (до 25 шт.) маленьких паяльных тиглей 2 емкостью 200—250 мл. УЗ колебания передаются к днищам тиглей по гибким волноводам 3 (рис. 8.38,б). Такая конструкция применяется при пайке и лужении малогабаритных деталей трубчатого излучателя, в результате чего активируется объем припоя внутри излучателя, где и происходит лужение деталей 2 [210]. Для концентрации УЗ энергии в паяемом изделии, погружаемом в ванну с припоем, между стенкой ванны и изделием располагают элемент, отражающий определенную часть УЗ энергии, возбуждаемой наконечником инструмента, погруженного в припой [211].

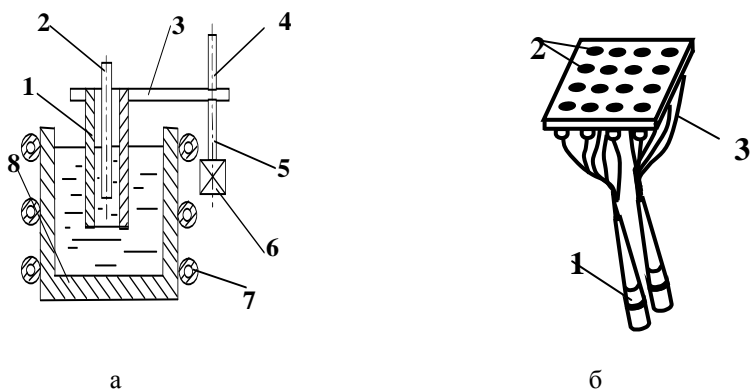


Рис. 8.38. УЗ ванны для длинномерных изделий (а): 1 – трубчатый излучатель, 2 – изделие, 3 – пластинчатый волновод, 4, 5 – волноводы, 6 – УЗ преобразователь, 7 – нагреватель; 8 – ванна; для пайки и лужения миниатюрных изделий (б): 1 - преобразователи; 2 – паяльные тигли, 3 – гибкие волноводы

Перспективным направлением в настоящее время является использование в технологических устройствах пьезоэлектрических преобразователей, собранных в пакеты. Это позволяет получить более высокий к. п. д. преобразования, стабильный при рабочих температурах до 330°С и более, повысить интенсивность ультразвуковых колебаний в рабочей зоне за счет применения фокусирующей формы преобразователей, использовать колебания различных частот для интенсификации процессов низкотемпературной пайки.

Для малогабаритных ванн лужения используют ферритовые преобразователи ультразвука, характеризующиеся высоким

электрическим к. п. д., простотой конструкции и малыми габаритами. Ферритовые преобразователи ввиду малых потерь и высокой точки Кюри могут работать в установках без систем охлаждения. Использование постоянных магнитов для подмагничивания снижает потребляемую преобразователями мощность. Для увеличения амплитуды колебаний, передаваемых в припой, волновод в установках лужения выполняют в форме ступенчатого концентратора.

В процессе УЗ активации расплавленный припой подвергается повышенному окислению, в результате чего на его поверхности образуется пленка окислов, препятствующая лужению. Удаление пленки механическими скребками снижает производительность лужения и увеличивает расход припоя. Для уменьшения окисления припоя в ванне ее герметизируют уплотнением с образованием окна в рабочей зоне лужения, куда припой подается в момент лужения [212], либо подают инертный или восстановительный газ на поверхность припоя [213]. Помещением УЗ волновода и ванны с припоем в герметичный корпус, куда через специальный ввод подается инертный газ, достигают полной защиты расплавленного припоя от окисления и высокого качества лужения равномерным слоем. Время воздействия УЗ колебаний на расплав припоя выбирают не более 2 с.

Точное позиционирование наконечника УЗ инструмента на объекте пайки осуществляют с применением иглы-индикатора, воздействующей на датчик, включающий подачу УЗ колебаний в момент совмещения наконечника с объектом пайки. При этом возвратно-поступательное перемещение инструмента может быть механизировано, что позволит устранить ручной труд на операции УЗ пайки и поручить оператору лишь функции контроля [214].

Лужение выводов полупроводниковых приборов и интегральных схем в технологии радиоэлектронной аппаратуры применяется при их подготовке к пайке. Однако существующие технологические процессы лужения не обеспечивают высокого качества из-за снижения паяемости гальванических покрытий выводов и невысокой химической активности применяемых спиртоканифольных флюсов. При бесфлюсовом лужении выводов интегральных схем в расплавах припоев ПОС61 и ПОСК50-18 в УЗ поле частотой $44 \pm 0,15$ кГц и амплитудой 9 ± 1 мкм, температура нагрева выводов увеличивается на $10-16^\circ\text{C}$, что равносильно повышению температуры припоя на $20-30^\circ\text{C}$. Это позволяет снизить температуру лужения до 200°C , благодаря чему значительно облегчается защита припоя от окисления. Полная защита расплавленного припоя от окисления достигается созданием защитной среды в зоне лужения,

например аргона в количестве $3 \cdot 10^{-5}$ м/с. Расстояние между излучающей поверхностью волновода и выводами интегральной схемы в процессе лужения должно быть не более 1,5–2,0 мм. УЗ бесфлюсовое лужение выводов микросхем исключает их флюсование и последующую очистку, в результате чего трудоемкость работ снижается на 50–70 % [55].

Для УЗ лужения выводов радиоэлементов и микросхем разработано устройство (рис.8.39), которое содержит магнитострикционный преобразователь 1, акустический трансформатор упругих колебаний 2, волновод 3, излучающую пластину 4, ванну с расплавленным припоем 5 [215]. Излучающая пластина выполнена из материала с высокой акустической добротностью, например титанового сплава ВТ-5, и имеет два участка, соединенных плавным изгибом. В верхнем более коротком участке выполнено отверстие, по диаметру рабочего торца волновода, который жестко присоединяется в этом месте к излучающей пластине пайкой тугоплавким припоем, например ПСр45.

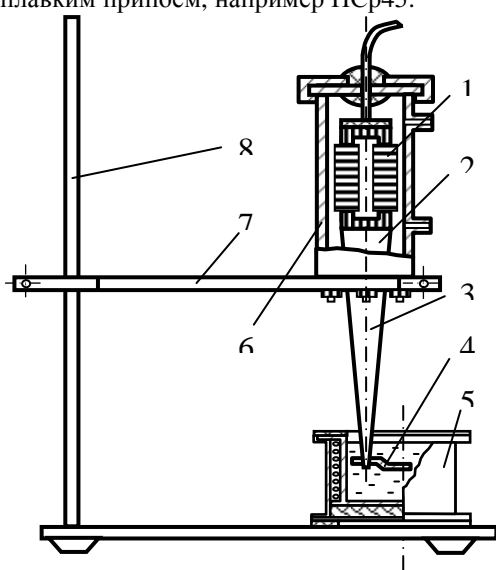


Рис. 8.39. Схема УЗ лужения

Нижняя основная часть излучающей пластины погружается в расплавленный припой. Глубина погружения соответствует длине обслуживаемых выводов изделий.

Магнитострикционный преобразователь 1 имеет герметичный металлический кожух 6, который крепится к акустическому трансформатору упругих колебаний в узле колебаний и в процессе работы охлаждается проточной водой. С помощью держателя 7 УЗ колебательная система перемещается вертикально по стойке 8, обеспечивая при наладке требуемую глубину погружения пластины. Длина излучающей пластины не должна превышать $\lambda/8$, так как при этом условии распределение амплитуд колебаний вдоль пластины имеет равномерный характер. При размерах пластины, меньших $\lambda/8$, затрудняется одновременное лужение всех выводов изделия, например резисторных сборок [216].

В том случае, если размеры превышают $\lambda/8$ и достигают $\lambda/4$, характер распределения амплитуд колебаний вдоль пластины будет иметь вид стоячей волны с узлами и пучностями колебаний, что ухудшит качество лужения.

Таким образом, при расположении излучающей пластины на глубине h в ванне с расплавленным припоем создается зона интенсивной кавитации, в которой и происходит лужение выводов изделий, погружаемых в припой на эту глубину. В результате локального введения УЗ колебаний в ограниченный объем припоя в ванне уменьшается его окисление, повышается качество лужения, снижается потребляемая мощность.

Для УЗ лужения выводов ИМС разработано устройство, схема которого приведена на рис. 8.40. Преобразователь магнито-стрикционного типа 4 устанавливается с помощью кронштейна 3 таким образом, чтобы излучающий элемент 1, погруженный в расплавленный припой 2, находился вблизи его поверхности. Преобразователь имеет герметичный металлический экран 5, который в процессе охлаждения проточной водой давлением до 10^5 Па. С выхода УЗ генератора электрическое напряжение подается на преобразователь в момент лужения путем дистанционного управления генератором с помощью блока коммутации БК и сенсорного датчика 6. Автоматическое перемещение деталей и их погружение в припой на заданную глубину в течении 1,5 – 2,0 с осуществляется поворотным механизмом транспортировки изделий 7, установленным на ванне с припоем. В расплавленном припое посредством излучающего элемента создается зона интенсивной кавитации, при погружении в нее выводов элементов происходят удаление окисных пленок и смачивание поверхностей припоем [217]. В результате локального введения УЗ колебаний в ограниченный объем припоя уменьшается его окисление, увеличивается

равномерность интенсивности ультразвука в зоне лужения, снижается потребляемая от источника мощность колебаний, что позволяет уменьшить звуковой шум от работы УЗ преобразователя.

Устройства УЗ лужения использовались для подготовки выводов радиоэлементов, резисторных сборок типа Б20 и микросхем в корпусе DIP, которых утратили паяемость в результате длительного складского хранения перед сборкой [218].

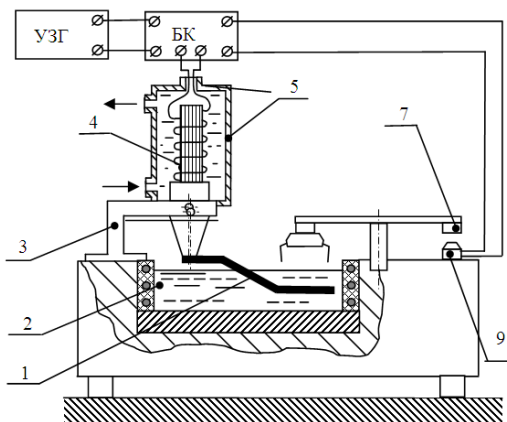


Рис. 8.40. Схема устройства УЗ лужения выводов ИМС

Для высокотемпературной УЗ пайки разработана установка с локальным индукционным нагревом в высоком вакууме металлических деталей, в том числе из нержавеющей стали. Передача УЗ колебаний от магнитострикционного преобразователя с частотой 44 кГц осуществляется гибким акустическим волноводом, представляющим собой пучок тонких металлических проводников, концы которых запаяны в наконечники. Ввод колебаний внутрь камеры обеспечивается фланцем с акустической развязкой, выполненной в виде четвертьволнового и полуволнового стаканов. Качество паяных соединений улучшается за счет дозированного внесения припоя в зону пайки с помощью манипулятора [219].

Разработано специальное УЗ технологическое оборудование для пайки и металлизации изделий. Установка для пайки и металлизации УММ-1 состояла из следующих основных элементов (рис. 8.41) [220]: УЗ генератора с излучателем магнитострикционного типа 4, электрических нагревателей изделия и инструмента 1-3, модернизированного металлообрабатывающего станка, на котором

размещена система крепления и поворота преобразователя 8.

В процессе металлизации вследствие нагрева преобразователя изменяется его резонансная частота, что приводит к уменьшению УЗ энергии, вводимой в расплав. Для устранения этого явления в установке введена обратная связь. Настройка генератора на резонансную частоту излучателя, а также контроль высокочастотной мощности на выходе генератора осуществлялись с помощью вольтамперваттметра Т41/1. Нагреватели деталей и инструмента снабжены системой контроля, регулирования и стабилизации температуры с точностью $\pm 1\%$. Применение установки позволило поддерживать оптимальные параметры процесса УЗ металлизации сплавов ВТ5-1 и АМГ-6.

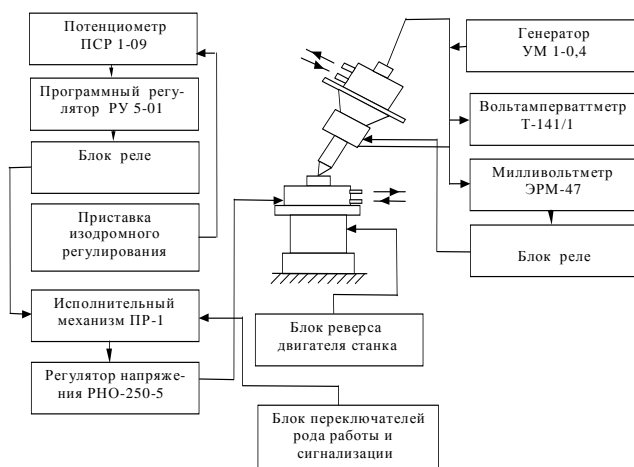


Рис. 8.41. Схема установки УЗ металлизации УММ-1

Полуавтоматическая установка металлизации УЗУН-1 [221], позволяет наносить покрытия на поверхность размером до 500 мм (рис. 8.42) и состоит из ультразвукового генератора типа УЗГ5-1,6/22 мощностью 4 кВт, работающего на частоте 22 кГц (1), подвижной акустической системы (2), станка для металлизации (3), а также пульта управления и сигнализации (4). В установке реализована схема механического сканирования ультразвуковой колебательной системой металлируемой поверхности. Ручная и автоматическая подача станка осуществляется в продольном и поперечном направлениях со скоростью

1–50 мм/с. Колебательная система содержит систему автоматического поддержания резонансной частоты. В установке предусмотрена возможность нанесения покрытий в диапазоне температур 20–500°С.

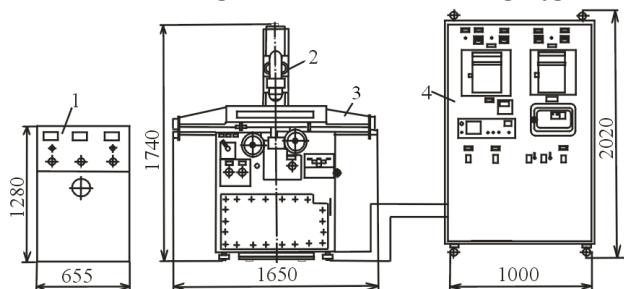


Рис. 8.42. Установка ультразвуковой металлизации УЗУН: 1– генератор, 2- подвижная акустическая система, 3- станок, 4- пульт управления и сигнализации

Для пайки плат печатного монтажа волной припоя с применением ультразвука разработана установка, позволяющая возбуждать в волне припоя УЗ колебания амплитудой до 20 мкм и направлять их перпендикулярно плоскости паяемых плат. В этой установке конструктивно «развязаны» акустическая система и устройство создания волны припоя, а также обеспечиваются регулировка ширины волны припоя в широких пределах, подача на волну припоя защитной пленки жидкости, предохраняющей его от окисления, и измерение амплитуды колебаний излучателей непосредственно в процессе пайки (рис.8.43) [222]. Минимальное время контакта исследуемой платы с расплавленным припоем, за которое происходит полное ее смачивание, определялось по максимальной линейной скорости перемещения платы относительно волны припоя. Скорость смачивания медных плат при температуре припоя 250°С уменьшается с увеличением расстояния от платы до излучателя, что объясняется поглощением УЗ колебаний расплавом припоя. Для медных плат условия пайки оптимальны при расстоянии от излучателя не более 1 мм и амплитуде смещений излучателя 10 мкм.

Наложение УЗ колебаний в процессе пайки с флюсом позволяет увеличивать скорость смачивания в 1,5–2 раза. Повышение активности флюса происходит только в период действия ультразвука. Этот способ активации волны припоя УЗ колебаниями дает незначительные преимущества при больших энергетических затратах. Так как в настоящее время медные поверхности печатных плат покрываются

легкопаяемыми покрытиями и используются водорастворимые флюсы, отличающиеся большей активностью, чем спиртоканифольный, применение способа ограничено.

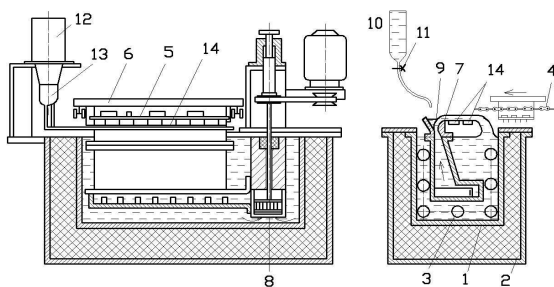


Рис. 8.43. Установка УЗ пайки плат волной припоя: 1– ванна, 2– теплоизолирующая камера, 3– нагреватель, 4– транспортер, 5– плата, 6– приспособление для пайки, 7– сопло, 8– насос, 9– паз для защитной жидкости, 10– емкость, 11– кран, 12– УЗ преобразователь, 13– концентратор 14– волновод

УЗ лужение и пайка применяются в технологических операциях сборки полупроводниковых приборов, например при посадке кристалла на корпус. Обычная флюсовая пайка вследствие трудности удаления остатков флюса ухудшает электрические параметры приборов, в результате чего брак составляет до 12% и более. Разработана установка УЗ лужения мест под напайку кристаллов полупроводниковых приборов средней и большой мощности, в которой припой переносится из ванночки на облуживаемый участок изделия с помощью наконечника инструмента за счет сил поверхностного натяжения. Лужение проводится в импульсном режиме в течение 1,5 с при мощности, подводимой к преобразователю, 140 Вт. Пайка кристаллов происходит сразу же после облуживания. Отрицательного влияния ультразвука на параметры и срок службы приборов не обнаружено [223].

УЗ лужение деталей можно осуществлять путем создания волны припоя высотой до 5 мм в жидком припое при интенсивности колебаний до $35 \cdot 10^3$ Вт/м², которая достигается за счет применения пьезоэлектрических преобразователей, а также последовательного соединения двух акустических трансформаторов скорости. Этим способом проводилось лужение окисленных медных поверхностей печатных плат, что позволило облуживать до 80% площади плат,

находящихся в области воздействия ультразвука [224].

Подача УЗ колебаний большой интенсивности в расплав припоя, воздействие колебаний на весь его объем в ванне вызывают повышенное окисление припоя, причем наибольшее шлакообразование происходит у дна стенок ультразвуковых ванн. Образующиеся окислы создают демпферный слой, поглощающий определенную долю УЗ колебаний, в результате чего качество лужения снижается. Необходимость удаления шлакового демпферного слоя скребком и повторное залуживание стенок увеличивают трудоемкость процесса лужения и приводят к повышенному расходу припоя. Предложено подавать УЗ колебания непосредственно на облуживаемые детали, погружаемые в расплав припоя, например на шасси телевизоров для лужения лепестков [225]. При этом снижается акустическая мощность, необходимая для лужения, и уменьшается окисление припоя. Однако такой способ можно применять лишь для металлических деталей сравнительно простой конструкции (лепестки, уголки и т. д.), поскольку для деталей сложной геометрической формы наблюдаются суперпозиция волн и интерференционные явления, вследствие чего невозможно достичь равномерного смачивания припоем. Кроме того, подача УЗ вибраций непосредственно на выводы электронных компонентов может привести к их повреждению из-за возникновения механических резонансов.

При выполнении паяных соединений в процессах сборки полупроводниковых приборов и интегральных схем в зоне соединения контактируемых миниатюрных элементов возбуждают поверхностные акустические волны ультра- и гиперзвуковой частоты, длина которых не превышает суммарной толщины соединяемых элементов. Для повышения качества соединений используют различные сочетания акустических волн Рэлея, Лэмба, Лява, Сезава, Стоили или электроакустические волны Гуляева – Блюстейна. Поверхностные акустические волны возбуждаются либо с помощью специального широкополосного пьезоэлектрического преобразователя либо с помощью СВЧ-резонатора, в пучности электрического или магнитного поля которых помещены тонкие пьезоэлектрические или магнитострикционные пленки [226].

Бесфлюсовую пайку и лужение изделий из алюминия и его сплавов осуществляют с использованием УЗ колебаний в режиме бегущей волны при постоянной амплитуде и переменной частоте. С целью повышения производительности процесса и улучшения качества лужения частоту

изменяют в пределах от $f_{min} = \frac{4c}{\lambda} \cdot \frac{1}{n}$ до $f_{max} = \frac{4c}{\lambda}$, где c — скорость распространения УЗ волны в материале изделия; λ — длина волны; n — целое нечетное число. При создании режима бегущей волны не возникает узлов и пучностей амплитуд смещений вдоль паяемой поверхности, что улучшает равномерность смачивания поверхности изделия по всей ее площади [227]. В схеме УЗ бесфлюсовой пайки плат к основанию корпуса микросборки (рис. 8.44) корпус 3 устанавливался между двумя УЗ системами, расположенными соосно друг против друга. Для надежной передачи энергии ультразвука корпусу волноводы 2 обеих систем были прижаты к нему с усилием 100–150 Н. Напряжение с генератора УЗГЗ–0,4 поступало на обмотки магнитоотрицательных преобразователей 1, соединенные последовательно.

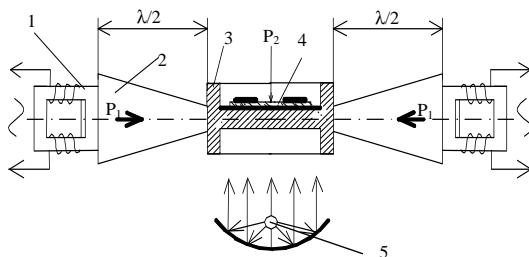


Рис. 8.44. Схема УЗ бесфлюсовой пайки подложек ГИС

Преобразователи настраивались на резонансную частоту 21,3 кГц путем применения параллельной схемы компенсации их реактивного сопротивления. Корпус нагревался инфракрасным излучением от двух кварцевых галогенных ламп КИ–220–1000 5, закрепленных в диффузных отражателях. В процессе пайки к плате 4 прикладывалось внешнее статическое давление величиной 1–5 Н, создаваемое подпружиненными штырьками в четырех точках платы.

Степень смачиваемости, как отношение площади платы, покрытой припоем, $S_{пр}$ к исходной S_0 , зависит от факторов УЗ воздействия (амплитуды и частоты колебаний, времени воздействия ультразвука) и технологических (температуры пайки, усилия прижима плат к корпусу, толщины прокладки дозированного припоя). Хорошее смачивание для всех типов покрытий и припоев достигается при амплитуде УЗ вибраций, равной 10–15 мкм, что соответствует выходному напряжению

генератора 50–55 В и току подмагничивания 2 А. При амплитуде более 20 мкм возможно распыление припоя в местах пучностей колебаний и загрязнение им поверхности плат.

Эффект подъёма припоя по излучающей поверхности волновода и использован при разработке устройства для УЗ лужения стеклокерамических конденсаторов без их погружения в расплав припоя. Устройство (рис. 8.45) [228] содержит 2 УЗ колебательные системы, состоящие из магнитострикционных преобразователей 1, акустических трансформаторов упругих колебаний 2, волноводов 3, рабочие концы которых имеют Г-образную форму и опущены в ванну 4 с расплавленным припоем 5. Колебательные системы установлены на основаниях, имеющих возможность точного горизонтального перемещения. Для расплавления припоя и поддержания необходимой температуры пайки и использования резистивный нагреватель 6. Г-образные концы волноводов колеблются в полуволновом резонансе, что приводит к появлению двух пучностей и узла колебаний.

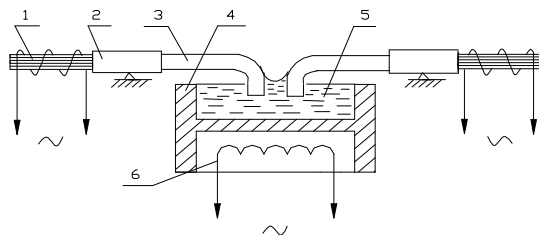


Рис. 8.45. Устройство УЗ лужения стеклокерамических конденсаторов

При колебании рабочего конца волновода на припой действует гидродинамическая сила, направленная перпендикулярно рабочей плоскости конца. Под действием её вертикальной составляющей припой поднимается до уровня верхней пучности, где удерживается за счёт адгезии. Таким образом, зона верхней пучности, расположенная выше уровня припоя в ванне, является рабочей, чем и обеспечивается возможность автоматизации процесса лужения.

Разработана и внедрена в серийное производство полуавтоматическая установка УЗ лужения торцов заготовок стеклокерамических конденсаторов с электродами из алюминиевой фольги. Изделия подаются в зону лужения с помощью ротора с зажимами со скоростью 5–100 мм/с. В качестве источников УЗ колебаний использованы 2 генератора типа УЗГ3–0,4. В акустических системах устройства применены магнитострикционные

преобразователи с резонансной частотой 44 ± 1 кГц. Лужение изделий осуществляется припоем ПЗ00К Sn–15%, Zn–65%, Cd–20% при параметрах: температура припоя 430–470°C, напряжение на выходе генератора 20–30 В, скорость лужения 40–60 мм/с. Внедрение автомата позволило полностью механизировать операцию лужения и обеспечить высокий процент выхода годных изделий (рис. 8.46).

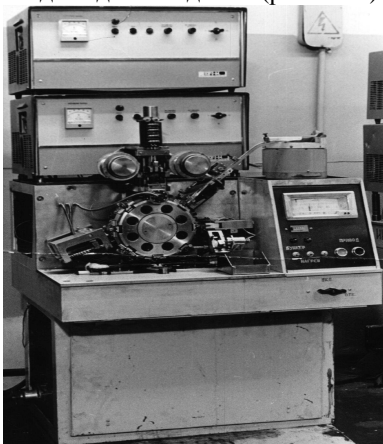


Рис. 8.46. Автомат УЗ лужения конденсаторов

Анализ конструкций устройств УЗ пайки и металлизации показывает, что они еще не обеспечивают высокой производительности процессов, требуемой при серийном или массовом типах производства изделий электроники. В большинстве конструкций устройств используются магнитострикционные преобразователи, имеющие значительные потери и габариты, требующие принудительного охлаждения. Перспективным направлением при разработке УЗ технологического оборудования является использование пьезоэлектрических преобразователей, питаемых от широкодиапазонных генераторов. Высокое качество пайки и металлизации можно достигнуть, обеспечив высокую интенсивность и равномерность кавитации в рабочем объеме, а также применив надежные средства измерения параметров УЗ воздействия.

Использование в технологических устройствах пьезоэлектрических преобразователей, собранных в пакеты, позволяет получить более высокий КПД преобразования, стабильный при рабочих температурах до 330°C и более, повысить интенсивность УЗ колебаний в рабочей зоне за счет применения фокусирующей формы преобразователей,

использовать колебания различных частот для интенсификации процессов низкотемпературной пайки.

Помещением УЗ волновода и ванны с припоем в герметичный корпус, куда через специальный ввод подается инертный газ, достигают полной защиты расплавленного припоя от окисления и высокого качества лужения равномерным слоем. Время воздействия УЗ колебаний на расплав припоя выбирают не более 2 с.

Установка УЗУ–9П предназначена для УЗ лужения и пайки деталей из керамики, феррита, алюминия и его сплавов мягкими припоями без применения флюсов. При этом окисная пленка разрушается непосредственно под расплавленным припоем, поэтому металл не успевает соединиться с кислородом воздуха и его поверхность смачивается припоем. Надежность УЗ лужения экспериментально проверена на целом ряде материалов, в том числе на керамике, ферритах, абразивных изделиях, угольных и графитизированных изделиях, стекле, рубинах. Установка УЗУ-9П состоит из генератора и УЗ паяльника УЗП2-0,025 (рис. 8.43) [229].



Рис. 8.43. Ультразвуковая установка УЗУ-9П

Установка применяется для лужения и пайки выводов к конденсаторам и сопротивлениям, проводов термопар, при сращивании алюминиевых кабелей, клемм и выводов заземления к проводам и кожухам, выполненным из алюминиевых сплавов, крепежных лепестков и отводов к стеклу, керамике, ферритам, полупроводниковым материалам, при нанесении покрытий из припоев.

Ультразвуковая установка ИЛ100–3/4 предназначена для лужения оловянно-свинцовыми припоями изделий из материалов трудно поддающихся лужению известными способами (рис. 8.44). С помощью этой установки можно паять изделия из алюминия и его сплавов; титана и его сплавов; нержавеющей сталей различного состава, стекла и керамики и т.д. [230]. Генераторы комплектуются магнестрикционными преобразователями на основе никелевых,

железобальтовых, железоалюминиевых и других магнитострикционных сплавов и материалов.



Рис.8.44. Установка УЗ лужения ИЛ 100-3/4

Высокоамплитудные магнитострикционные преобразователи фирмы «Ультразвуковая техника–Инлаб» с амплитудой колебаний до 40 мкм и электроакустическим КПД 60–80 % имеют длительный срок службы (3–10 лет), стойкость к ударам и значительным механическим нагрузкам выгодно отличает их от пьезокерамических преобразователей. УЗ устройства предназначены для лужения деталей из алюминия и его сплавов, металлизации керамика, стеклокерамики, ферритов, а также бесфлюсовой пайки легкоплавкими припоями деталей электронной аппаратуры. Для лужения, металлизации и пайки применяются оловянно-свинцовые, оловянно-цинковые и другие припои с температурами плавления от 133 до 300 °С.

Исходя из потребностей производства большое количество компаний предлагают различные УЗ паяльные станции от компании MBR Electronics - USS-9200, USS-9500, USS-1904. Паяльные станции USS-9200 и USS-9500 (рис. 8.45) предназначены для небольших производств и исследовательских лабораторий. В комплекте станций имеется цифровой блок управления на микропроцессоре, ультразвуковой паяльник, а также приспособления для разогрева и монтажа. Достоинствами данных станций являются их небольшие габаритные размеры, автоматическая подстройка на резонансную частоту и автоматическая система поддержания температуры [231].

Для крупносерийного производства предназначена паяльная станция USS-1904, (рис. 8.45,6) которая имеет габариты, позволяющие использовать ее в стойках автоматических линий. Для УЗ лужения и пайки компания Advanced Sonic Processing Systems (США) предлагает

широкий набор УЗ паяльных ванн, предназначенных для лужения и пайки элементов различной конфигурации и размеров [232].



а



б

Рис. 8.45. УЗ паяльные станции: а - USS-9200, б - USS-9500

До недавнего времени УЗ энергия всегда применялась непосредственно к расплаву в ванне, чтобы обеспечить приемлемое сцепление и смачивание через кавитацию. Однако возможна передача УЗ энергия непосредственно на твердое алюминиевое крепление, предварительно нагретое до температуры пайки и далее передачу через основание, чтобы сформировать соединение внахлест, содержащее припой. Таким образом, можно формировать припойные столбики на кремниевых чипах, носителях чипов и печатных платах [233,234].



Рис.8.45. УЗ паяльная станция USS-1904

Для получения припойных столбиков компонент закрывается фоторезистивной маской, которая служит также и формой для припоя. Схема формирования припойных столбиков УЗ технологией приведена на рис. 8.46. Кремниевая пластина 1 погружалась в волну припоя 2, создаваемую мотором 3, при температуре 220–240°C. УЗ колебания

частотой $16,5 \pm 2$ кГц от преобразователя 4 подавались в волну припоя. Одновременно в эту область подавался защитный газ – азот со скоростью до 5 л/мин для снижения окисления припоя [235].

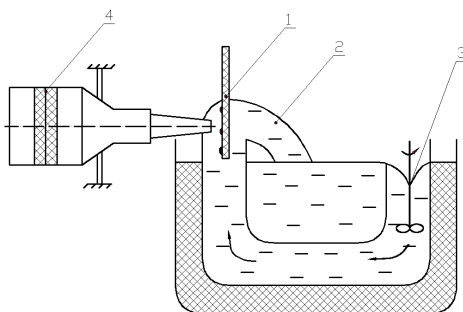


Рис. 8.46. Схема формирования припойных столбиков на пластине

8.7. Влияние параметров ультразвуковых процессов на прочностные и электрические свойства соединений

Увеличение эффективности отделения окисной пленки с алюминия и его сплавов достигнуто введением в расплав оловянно-цинкового припоя от 1–2 до 7–8 % ферротитановых опилок с размером зерен 0,5–0,8 мм [236]. Для выявления механизма УЗ лужения и исследования количественных соотношений между кавитационной и абразивной эрозией были проведены опыты по лужению образцов из алюминиевого сплава АМЦ на экспериментальной установке (рис. 8.47) [237]. От генератора ультразвука 8 и источника подмагничивания 9 на магнитострикционный преобразователь 1 подавалось напряжение частотой 18–22 кГц и постоянный ток до 10 А.. Ультразвуковые колебания посредством концентратора 2 передавались ванне лужения 3, где находился расплавленный припой при контролируемой температуре. В качестве приемника ультразвука применялся шуп с пьезоэлектрическим датчиком 4, сигнал с которого поступал на усилитель 5, анализатор спектра 6 и самописец 7. Возникновение кавитации в припое отмечалось появлением сигнала со сложным спектром на экране анализатора. Изучение изменения весового коэффициента эрозии при УЗ лужении алюминия в ванне с припоем, содержащим в качестве абразива опилки ферротитана, показало, что кроме кавитационной возможна также абразивно–кавитационная эрозия.

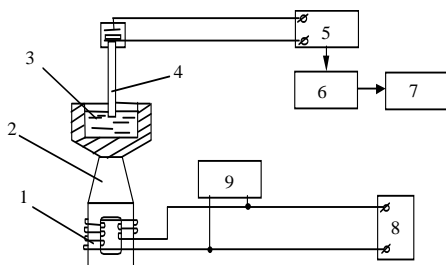


Рис. 8.47. Схема установки кавитационно-абразивного лужения

Глубина общей эрозии образца в этих условиях возрастала от 0,50 до 0,76 мм. На графике зависимости УЗ давления в расплаве припоя от амплитуды колебаний видно, что в расплаве возникают две области состояния жидкого припоя: докавитационная I и кавитационная II (рис. 8.48). Обычное УЗ лужение происходит в области II при интенсивности $(10,8-11,6) \cdot 10^8$ Вт/м². При введении в расплав абразива УЗ лужение алюминия возможно и в области I при интенсивностях $(2-8) \cdot 10^3$ Вт/м², когда кавитационный процесс возникает у поверхности образца и не наблюдается во всем расплаве. Вероятной причиной этого является снижение прочности расплава ввиду наличия в нем абразивных частиц, что вызывает кавитацию при меньшей мощности ультразвука.

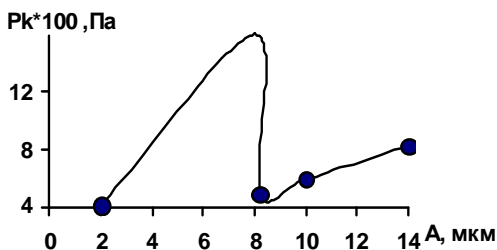


Рис. 8.48. Зависимость УЗ давления в расплаве припоя от амплитуды колебаний

Процесс УЗ лужения деталей и элементов исследован в модернизированной УЗ ванне УВЛ-0,4, в которой за счет использования конического концентратора с коэффициентом трансформации 2,5 интенсивность УЗ колебаний увеличилась в 1,5 раза. Для стабилизации температуры припоя был применен блок измерения и регулирования температуры, состоящий из прибора МЗОЗК, термопары ХК и силового

реле [208]. Интенсивность кавитации в расплавленном припое измеряли с помощью кавитометра и пьезоэлектрического датчика, щуп которого при измерениях погружали в расплав припоя. Интенсивность кавитации P_K ; в расплаве припоя ПОС61 на резонансной частоте преобразователя 20,5 кГц линейно зависит от выходного напряжения УЗ генератора, т. е. от вводимой в расплав мощности ультразвука (рис. 8.49, а). Интенсивность кавитации достигает максимального значения на дне ванны и нелинейно падает при увеличении расстояния h от дна, являющегося мембраной преобразователя (рис. 8.49, б).

УЗ лужение выводов резисторов типа МЛТ, микросхем типа Dip, конденсаторов К50, К53, диодов 2Д503А, блоков резисторов Б20, имеющих неудовлетворительную паяемость и требующих ручной зачистки, позволило в течение 2 с восстановить их паяемость и получить ровный блестящий слой припоя на выводах.

При бесфлюсовой пайке микроплат в корпусе модулей степень смачиваемости, как отношение площади платы, покрытой припоем, $S_{ПР}$ к исходной S_0 , исследовалась в зависимости от факторов УЗ воздействия (амплитуды и частоты колебаний, времени воздействия ультразвука) и технологических (температуры пайки, усилия прижима плат к корпусу, толщины прокладки дозированного припоя) [238].

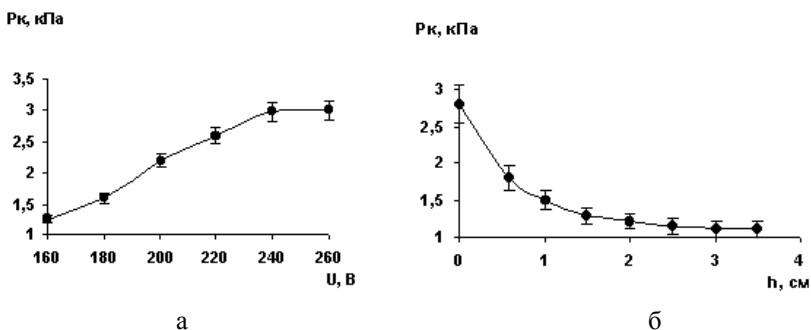


Рис. 8.49. Зависимости интенсивности кавитации в расплаве припоя от напряжения на выходе генератора (а) и расстояния до дна ванны (б)

В результате исследования зависимости степени смачиваемости от амплитуды УЗ колебаний установлено, что достаточно хорошее смачивание для всех типов покрытий и припоев достигается при амплитуде УЗ колебаний, равной 10 мкм, что соответствует выходному напряжению генератора 50 В и току подмагничивания 2 А. При увеличении амплитуды колебаний до 20 мкм возрастания степени

смачивания не происходит, так как при значительной интенсивности УЗ колебаний, вводимых в припой, интенсифицируются и процессы окисления припоя. При амплитуде выше 20 мкм возможно распыление припоя в местах пучностей колебаний и загрязнение им поверхности плат. Поэтому рекомендуемая амплитуда УЗ колебаний должна находиться в пределах 10–15 мкм.

Высокая смачиваемость паяемой поверхности микрополосковых плат получена при воздействии УЗ колебаний в течение 15с на резонансной частоте преобразователя. Изменение частоты колебаний на величину, соответствующую $\lambda/16$, снижает кавитационное давление в припое с 6 до 2,8 кПа, однако этого давления достаточно для эффективного удаления окисных пленок. Оптимальное усилие прижима микрополосковых плат к основанию корпуса составило для припоя ПОС61 3–5Н в интервале температур процесса пайки 220–240°С, для припоя ПОИ 50 1–2Н при 160–180 °С (рис. 8.49). Процесс УЗ бесфлюсовой пайки микрополосковых плат в режиме бегущей волны при постоянной амплитуде и переменной частоте колебаний обеспечивает высокую производительность процесса и не оказывает отрицательного влияния на рабочие параметры изделий.

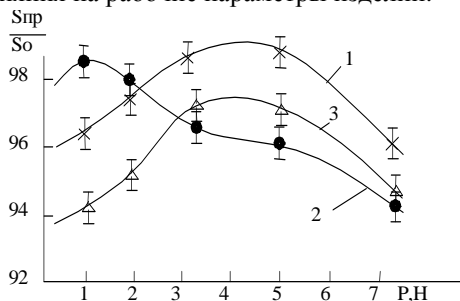


Рис. 8.49. Зависимости степени смачиваемости подложек припоем от усилия прижима их к корпусу микросборки: 1 – покрытие олово – висмут, припой ПОС 61; 2 – припой ПОИ 50; 3 – покрытие золотом, припой ПОС 61

Отмечено также [239], что УЗ смачивание выводов припоем улучшает паяемость и сопротивление старению по сравнению с офлюсованными выводами. Вследствие кавитации при УЗ пайке, золотое покрытие могло быть удалено полностью и быстро.

Фундаментальные исследования процесса УЗ пайки для изделий электроники были проведены в Sandia National Laboratories (США) P.T.

Vianco и др. [240]. Подложки из бескислородной, высокопроводимой меди разрезались на квадратные образцы размерами 2,54x2,54 см и толщиной 0,159 см. Медные образцы были оценены в одном из следующих состояний: только полученные; травленные кислотой (погружение в азотную и серную кислоты с последующим ополаскиванием); травленные в кислоте и выдержанные на воздухе при 150°C в течение 25 минут; травленные в кислоте с отжигом на воздухе при 250°C в течение 25 мин. Использовались припой: 100Sn и эвтектический сплав 60Sn-40Pb.

УЗ источник (Ultra-Tip™ Lab-Line Instruments) имел наконечник диаметром 0,318 см, который возбуждался пьезоэлектрическим преобразователем с резонансной частотой 20 кГц в диапазоне мощности 20–70 Вт со стабильностью $\pm 2,5$ Вт. Типовая геометрия волновода и образца, изображенная на рис. 8.50 была определена параметрами: А–зазор между волноводом и образцом; В–глубина погружения. Зазор между волноводом и образцом поддерживался 6,35 мм. Припой был нагрет нагревателем, управляемым контроллером (UDC2000, Honeywell Corp.), который стабилизировал температуру до $\pm 1^\circ\text{C}$. Степень смачивания поверхностей подложки определена анализом цифровые изображения поверхностей и рассчитана с помощью компьютерного пакета (Ultimage™ Graftek). Анализ был выполнен как на передних, так и на обратных поверхностях образцов, которые были очищены от шлака припоя и частиц застывшего припоя.

Оценен капиллярный подъем припоя 60Sn-40Pb в пределах соединительного зазора, сформированного между двумя параллельными пластинами размерами 0,076, 0,127, и 0,254 мм. Медные пластины размером 5,08x5,08 см и толщиной 1,59 мм были очищены, протравлены и отожжены на воздухе при 150°C в течение 25 мин, а затем сварены в одной точке. Глубина погружения образцов в припой была 3,81 см.

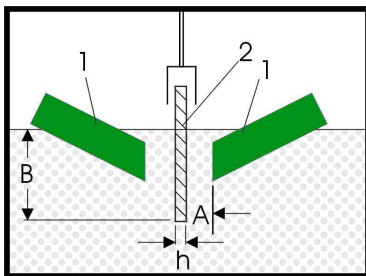


Рис. 8.50. Схема УЗ системы пайки: 1– излучатель, 2–образец

Испытания проводились при параметрах 50%-ой мощности в течение 15 с, причем мощность не вводилась, пока образцы не были погружены в ванну. После завершения испытания, рентгенограммы, сделанные для каждого из образцов, показали степень заполнения припоем соединительного зазора. Эффективный капиллярный подъем был рассчитан, используя количественный анализ изображения, и выражен как высота припоя относительно поверхности ванны. Процент пустот в пределах соединения был также вычислен. Схема типовой геометрии тестового образца приведена на рис. 8.51.

Дана количественная оценка размеру смачивания припоем образцов как функции уровня мощности при УЗ активации мощностью 55–60 Вт в течение 15 с в 100Sn, при этом ошибка в площади смачивания была порядка 7% на передней и задней поверхностях. Зависимость смачивания от уровня мощности приведена на рис. 8.52 для образцов, погружаемых в ванну с 100Sn при температуре 245°C и времени 30 с.

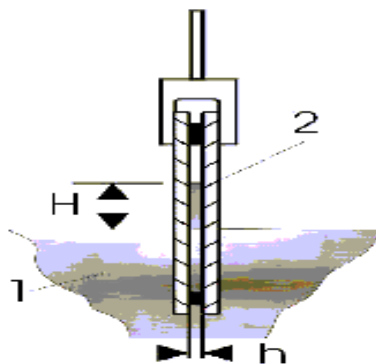


Рис. 8.51. Схема тестового образца с параллельным зазором между платами: 1— припой, 2—образцы плат

Передняя поверхность показала большую степень смачивания, чем задняя при мощности в пределах 25–45 Вт, однако различие стало незначительным при более высокой мощности 55–60 Вт.

Получена зависимость степени смачивания от времени воздействия УЗ, которая также является функцией от температуры паяльной ванны. При 254°C на передней поверхности область смачивания увеличивалась на 42% за время воздействия 5 с, в сравнении с 90% при 30 с. При 296°C значение 90% смоченной области было отмечено как при 5 и 15 с. Как

только время и температура процесса увеличивались, различие в области смачивания на передней и задней поверхностях уменьшалось.

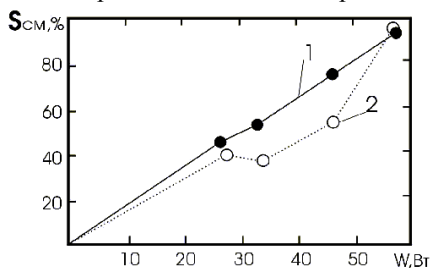


Рис. 8.52. Зависимость площади смачивания от уровня мощности для медных проводников: 1–передняя 2– задняя поверхности

Качественная оценка эрозии поверхности показала, что при длительном времени и высокой температуре размер и глубина эрозии на передней поверхности увеличивались. Эрозия задней поверхности во всех случаях была незначительной. Слой покрытия формировался в областях, которые не находились непосредственно на линии источника УЗ. Размер смачивания на обеих поверхностях являлся функцией уровня мощности, времени воздействия УЗ и температуры паяльной ванны. Оптимальные параметры УЗ активации выбираются при максимальном смачивании поверхности и минимальной ее эрозии.

Зависимости эффективного капиллярного подъема припой от величины зазора при 50% мощности и времени 15 с для образцов, погружаемых в припой с канифольным флюсом и с УЗ активацией, приведены на рис.8.53.

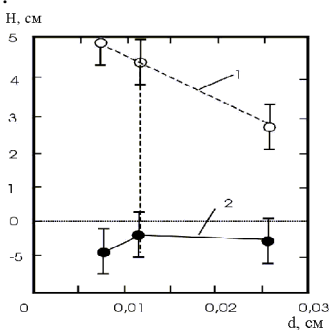


Рис.8.53. Зависимость капиллярного подъема от ширины зазора для медных образцов при 50% мощности и 250С: 1–флюс, 2– ультразвук

При УЗ активации отмечено, особенно для малых зазоров в соединении, припой заполнял зазор приблизительно до уровня ванны, но не больше. Значение высоты мениска в случае УЗ активации зависело от величины зазора и было значительно меньше по сравнению с присутствием флюса.

При погружении образца профиль припоя образует выпуклую форму, что вызывает малую область контакта его с поверхностями платы в основании зазора. Кавитация удаляет оксидную пленку и таким образом позволяет припою как смачивать, так и продвигаться далее по поверхности. Этот процесс продолжается пока припой не заполнит соединительный зазор. Однако, когда припой поднялся на уровень ванны, гидростатическое давление становится нулевым и в дальнейшем смачивание не происходит. Капиллярный подъем очень ограничен при малых зазорах 0,76 мм, так как поверхностное натяжение припоя не позволяет расплаву металла заполнить зазор между платами при кавитационном процессе. Тем не менее, очевидно, что минимальный зазор существует, который позволяет профилю припоя частично контактировать с поверхностями. Альтернатива может быть в размещении заготовки припоя в соединительном зазоре и расплавление ее при УЗ активации. Отмечено отсутствие пустот в припое, что заполнил соединительный зазор при УЗ активации, что является очевидным преимуществом перед традиционным применением флюсов, которые создают пустоты в зазоре.

Эксперименты с использованием точечного источника ультразвука, 100% Sn, и припоя 60Sn–40Pb показали, что оксид удаляется посредством кавитации в припое в результате комбинации механической эрозии и проникновения УЗ энергии в геометрию подложки. Энергия рассеивается внутри тела подложки и таким образом кавитационный процесс может потенциально обрабатывать поверхности подложки, которые не находятся на прямой линии от источника УЗ. УЗ активация является также эффективным средством полного растворения защитной пленки Au с поверхностей выводов электронных компонентов погружением в паяльную ванну при умеренных режимах мощности ультразвука.

Одновременно с разработкой процессов УЗ пайки металлов ультразвук был применен для металлизации неметаллических материалов, стекла, керамики, ферритов. С этой целью поверхность паяемых деталей подвергалась предварительной обработке, например пескоструйной, для образования развитого микрорельефа. После

подогрева деталей до температуры плавления припоя они погружались в УЗ ванну с расплавом припоя или облуживались с помощью УЗ паяльника. Для УЗ металлизации использовались оловянно-цинковый (П200А) и свинцово-серебряный (ПСр3) припои (табл. 8.6) [241,242]. Механическая прочность на разрыв соединений, полученных ультразвуковой пайкой, почти в 2 раза превышала прочность соединений, полученных обычной пайкой по слою серебра, нанесенного вжиганием пасты [243].

На прочность сцепления металлизации с паяемой поверхностью неметаллического материала оказывают влияние степень шероховатости поверхности и длительность кавитационного воздействия. Более развитые поверхности увеличивают общую площадь сцепления и соответственно повышают величину разрывного усилия. Под действием кавитационных микроударов поверхность керамики очищалась от мелкой фракции основного материала, открывался доступ к порам, которые под действием возникающих в припое высоких давлений заполнялись припоем, обеспечивая тем самым достаточную прочность сцепления. Время кавитационного воздействия составляло 0,5–5 мин.

Отмечено, что после длительного УЗ воздействия механическая прочность керамики резко снижается. Под воздействием кавитационных микроударов в ней образуются зоны ослабленной прочности, величина которых зависит от типа керамики, мощности, вида ультразвуковых волн и длительности ультразвукового воздействия. Поэтому длительность кавитационного воздействия должна быть ограничена временем получения оптимальной прочности спая [244, 245].

Исследование механической прочности УЗ спаев различных типов припоев с установочной керамикой свидетельствует о том, что выбор припоя для металлизации играет важную роль (табл. 8.7,8.8). Как показал анализ, только применение оловянно-цинковых припоев обеспечивает получение достаточной прочности спая с керамикой. Для стеатитовой керамики прочность сцепления припоев ПОС 30, ПОС 61 и П250А зависит от степени шероховатости поверхности керамики (рис. 8.54). Наибольшая прочность, которая составила 17,9 МПа, достигнута для шероховатых поверхностей, подвергнутых дробеструйной обработке и металлизированных припоем П250А 1, по сравнению с обычными не обработанными поверхностями 2, что в 2–2,5 раза выше прочности сцепления серебряных покрытий с керамикой [246].

Исследование процесса УЗ металлизации установочной керамики марок 22ХС и Ф–58 в виде плоских шайб диаметром 20мм и толщиной 2–3 мм, а также конденсаторной керамики марок Н–30, Н–90, Н1500 в

виде пластин 20×20 мм и толщиной 0,2–0,25 мм проводилось на частотах 22 и 44 кГц с использованием УЗ ванн и паяльников.

Таблица 8.7

**Прочность соединений, полученных УЗ пайкой
неметаллических материалов**

Материал соединения	Припой	Вид паяного соединения	Прочность при растяжении, МПа	Место разрыва
Керамика – керамика	П200А	Встык	7,8–11,7	По месту пайки
	П200А	Внахлест	9,3–12,7	
	ПСр3		10,8–13,7	По керамике
Керамика–стекло	П200А	Встык	2,9–4,1	По месту пайки
	П200А	Внахлест	5,6–7,4	
	ПСр3		5,6–6,9	
Феррит– феррит	П200		2,9–17,6	По стеклу
	ПСр3	Встык	17,6–19,6	По ферриту

Таблица 8.8

Прочность сцепления УЗ металлизации с керамикой

Тип припоя	Температура плавления, °С	Температура металлизации, °С	Предел прочности, МПа
Bi—Sn	120	150	2,78
Sn—In	117	150	5,89
Sn—Pb (ПОС61)	183	240	3,1–4,2
ПСр3	300	350	5,6–7,4
Sn—Zn (П200А)	200	260	13,7–15,0
Sn — Zn — Al	325	380	16,5–18,4

Более стабильные результаты получены при металлизации в специальной камере, выполненной с учетом геометрии металлируемого образца, при следующих режимах для керамики марок 22ХС и Ф–58: амплитуда УЗ колебаний 3–5 мкм, величина зазора между излучателем и металлируемой поверхностью 0,2–0,44 мм, угол наклона излучателя 40–55°С, скорость металлизации 830 мм/мин, температура металлизации на 5–10°С выше температуры плавления припоев ПОС 40, ПОС 61, ПСр3, ПСрОС58. Процесс металлизации идет более стабильно на частоте 44,5 кГц, однако положительных

результатов при УЗ металлизации конденсаторной керамики достигнуто не было. Это объясняется хрупкостью образцов, их разрушением под воздействием температуры и кавитации [247].

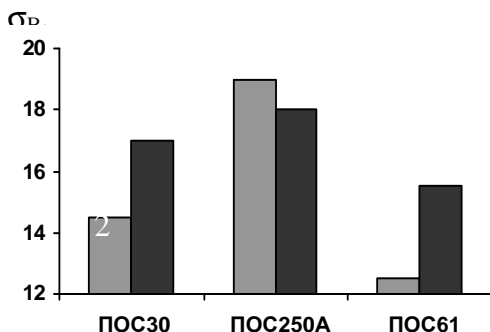


Рис. 8.54 Прочность сцепления металлизированного слоя с керамикой для необработанных (1) и шероховатых (2) поверхностей

Таким образом, наряду с определенными требованиями к паяемой поверхности, типу припоя необходимо специальное технологическое оборудование для УЗ металлизации. Как показал опыт производственной работы, рационально выбирать мощность ультразвуковых колебаний 100–200 Вт. Мощность излучаемой энергии целесообразно регулировать за счет изменения амплитуды электрических колебаний задающего генератора. Рекомендуются экспоненциальный или катеноидальный волноводы-концентраторы, а в качестве материала волноводов-концентраторов – титан [248].

Ввиду ряда недостатков, присущих методу металлизации с использованием ручного ультразвукового паяльника, разработана специальная ультразвуковая установка металлизации пьезокерамики УМП-1, состоящая из следующих основных элементов [249]: ультразвукового генератора УЗГ-2,5А; механизма перемещения кассеты, в качестве которого использовалась станина со столом от горизонтально-фрезерного станка; магнитострикционного преобразователя типа ПМС-7 с концентратором, в выходной торец которого ввинчивался сменный инструмент; электрического нагревателя с системой терморегулирования в диапазоне температур 200–300°С с точностью $\pm 5^\circ\text{C}$; кассеты для размещения пьезокерамических деталей различных типоразмеров; пульта

управления и сигнализации. Инструмент представлял собой полувогнтовой волновод с малой конусностью, сточенный у меньшего основания до радиуса 5 мм. Система крепления и поворота преобразователя позволяла устанавливать инструмент под углом в пределах 0–90° по отношению к поверхности металлизироваемой детали.

В процессе эксплуатации установки было определено, что наиболее эффективная металлизация осуществляется при зазорах между излучателем и изделием 0,1–0,4 мм на частоте 22 кГц и при акустической мощности 500–600 Вт. Дальнейшее увеличение мощности вызывает фонтанирование и распыление расплава. Скорость перемещения обрабатываемых деталей регулировалась в пределах 10–100 мм/мин. Наиболее оптимальное значение угла наклона инструмента соответствует 45–65°.

Исследование пограничной области соединения пьезокерамика – припой П200А, полученного УЗ металлизацией, проведенное с использованием различных методов изучения переходной зоны, показало, что проникновение цинка в глубь керамики имеет место за счет межкристаллитной диффузии, причем для пьезокерамики ВаТiО₃ это проникновение достигает 40 мкм. В переходной области отмечено образование новых фаз за счет химического взаимодействия цинка с компонентами пьезокерамики [250].

Рентгеноструктурный анализ переходной области спая с пьезокерамикой показал, что в системах керамики ТБК-3 и ЦТБС-3 присутствуют окислы цинка и кремния, а также новая фаза Zn₂SiO₄. Самая широкая переходная зона с наибольшей микротвердостью (по сравнению с припоем) образуется при содержании цинка в припое 5–7 мас.%, поэтому этот состав признан оптимальным для металлизации пьезокерамики [251].

Оловянно–цинковые сплавы эвтектического состава П200А (90% Sn, 10% Zn) и заэвтектического П250А (80% Sn, 20% Zn) ввиду хорошей смачиваемости и растекаемости при воздействии ультразвуковых колебаний, высокой механической прочности и устойчивости против коррозии в наибольшей степени пригодны для металлизации керамических и стеклокерамических материалов. Предел прочности при растяжении металлизированного покрытия на керамических образцах достигает 39–50 МПа, причем разрыв образца происходит главным образом по керамической основе, что указывает на более высокую прочность сцепления покрытия по сравнению с прочностью керамики.

Оловянно-свинцовые сплавы ПОС40, ПОС61 дают худшие

результаты по прочности сцепления с основным материалом. Отсутствие в их составе адсорбционно-активного элемента цинка приводит к тому, что прочность сцепления припоя со стеклокерамическими материалами зависит только от степени шероховатости поверхности и определяется сравнительно слабыми силами Ван-дер-Ваальса. Присутствие свинца в больших количествах делает эти припои коррозионно-неустойчивыми. Предел прочности при растяжении металлизированного покрытия на керамике не превышает 15 МПа. Расплавы припоев на свинцовой и оловянной основе с цинком и кадмием, содержащие по 3–4 компонента, под воздействием ультразвука значительной интенсивности могут изменять свой состав [252].

Экспериментально исследовано влияние вида ультразвуковых колебаний на величину кавитационного давления в расплавах припоев и на прочность спаев со стеклокерамическими материалами [253,254]. Возбуждение различных видов ультразвуковых колебаний осуществлялось с помощью магнитострикционных преобразователей: продольных колебаний с частотой 44 кГц (а), поперечных 41 кГц (б), крутильных 22 кГц (в), импульсных продольных колебаний со скважностью 2–6 (г) по схемам, изображенным на рис. 8.55.

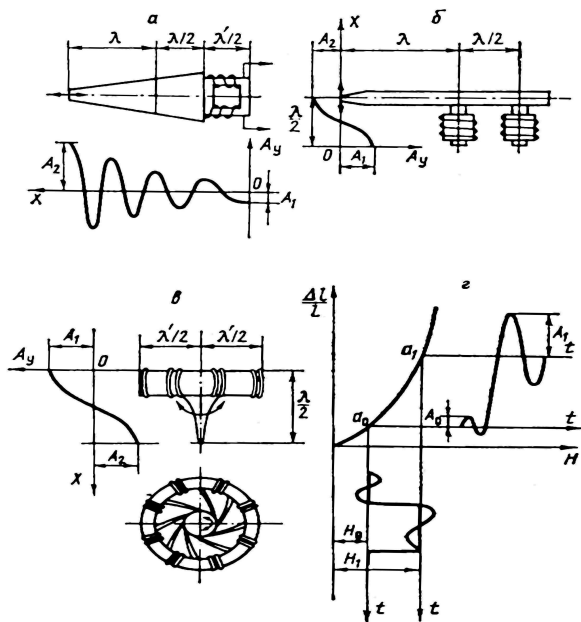


Рис. 8.55. Схема возбуждения УЗ колебаний в припое

Источником питания преобразователей служил генератор УЗГ3–0,4 выходной мощностью 400 Вт. Амплитуда колебаний излучающего торца волновода составляла 8–10 мкм. Величина зазора между излучающим торцом волновода и металлируемой поверхностью регулировалась с помощью микрометрического механизма перемещения. Возбуждение импульсных продольных колебаний достигалось подачей импульса тока подмагничивания амплитудой H_1 , при этом рабочая точка смещалась на более крутой участок характеристики преобразователя. Амплитуда импульсных колебаний A_1 в 1,5–3,5 раза превышала амплитуду непрерывных колебаний A_0 . Генерирование импульсов колебаний осуществлялось с помощью специального генератора. Для увеличения постоянной составляющей тока подмагничивания был использован дополнительный источник постоянного тока типа ВСА-10 (рис. 8.56).

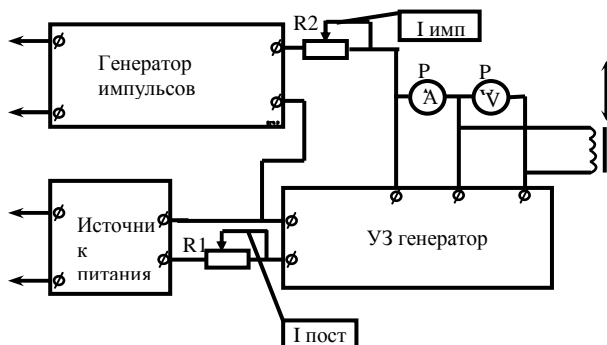


Рис. 8.56. Схема возбуждения импульсных УЗ колебаний

УЗ металлизацию стеклокерамических материалов на основе керамики марок Т-80, Т-150, Т-260 и стекла проводили легкоплавкими оловянно-цинковым припоем П200А и экспериментально разработанным припоем на основе свинца и олова с добавками цинка и индия [255]. УЗ кавитационное давление в расплавах припоев измерялось кавитометром по величине спектральной плотности кавитационного шума в полосе частот 100–200 кГц. Давление в кавитационной области воспринималось измерительным щупом с рабочей площадью 0,8 см², соединенным с пьезоэлектрическим преобразователем упругим волноводом. Датчик был снабжен нагревателем, позволяющим поддерживать необходимую температуру воспринимающей поверхности измерительного щупа.

Прочность сцепления припоев с поверхностью стеклокерамики оценивали по напряжению отрыва участка металлизации. Кратность повторения опытов была не менее пяти. С целью повышения точности измерений усилия отрыва, а также исключения ударных нагрузок образцы нагружали на разрывной машине РП-100 в два этапа: предварительное со скоростью 1,5–1,8 кН/мин и основное 8,8 кН/мин. Уровни кавитационного давления в припое Pb–Sn–Zn–In при различных видах УЗ колебаний, вводимых в тонкий слой припоя размером 0,1 мм между излучателем и измерительным щупом, приведены в табл. 8.9.

Таблица 8.9

Кавитационное давление в расплаве припоя при различных видах колебаний

Вид колебаний	Частота, кГц	Амплитуда колебаний, мкм	Кавитационное давление, кПа
Продольные	44	8—10	2,8—3,0
Поперечные	41	8—10	3,6—3,8
Крутильные	22	10-15	0,5
Продольные импульсные	44	10-15	3,5—3,7

Как показывает анализ экспериментальных данных, при введении в расплав припоя колебаний, параллельных паяемой поверхности, при расстояниях между торцом излучателя и поверхностью 0,1 мм значение кавитационного давления в припое возрастает в среднем на 25%, что позволяет повысить производительность процесса металлизации и улучшить качество соединений [256].

УЗ металлизация перспективна и для синтетических материалов, поскольку устраняет длительные и трудоемкие процессы металлизации традиционными методами. УЗ металлизации подвергались сополимеры стирола марок САМ, МЕН, СТАН, ПС-СУ, СНП-С низкотемпературными сплавами Вуда и состава Cd–Pb–Bi. Металлизируемые образцы (круглые пластины диаметром 20 мм и толщиной 5 мм) предварительно механически обрабатывались и обезжиривались. За критерий, определяющий качество металлизации, была принята адгезионная прочность покрытия при испытании на разрывной машине РМ–101 со скоростью 25 мм/мин [257].

В результате исследований были определены максимальная адгезионная прочность металлизации с указанными типами

сополимеров (табл. 8.10), а также оптимальные технологические параметры процесса металлизации: электрическая мощность на выходе генератора P_A , оптимальный зазор между излучателем и поверхностью δ и угол наклона излучателя α . При увеличении электрической мощности на выходе генератора, а следовательно, и акустической мощности, вводимой в расплав, повышается адгезионная прочность соединения металл–полимер. При мощности свыше 200 Вт расплав интенсивно распыляется под действием кавитации, что сопровождается снижением прочности металлического покрытия и ухудшением его качества.

Оптимальная величина зазора в процессе металлизации полимеров между инструментом, излучающим ультразвуковые колебания, и обрабатываемой поверхностью составляет 0,2– 0,3 мм, а угол наклона инструмента к поверхности изделия – 20°. При этих значениях δ и α величина прочности соединения металлопокрытия с полимером наибольшая (рис. 8.58). Высокая адгезионная прочность соединений металл–полимер (7–13 МПа) может быть объяснена наличием диффузионных процессов на границе их раздела, а также химическим взаимодействием активных групп и радикалов полимера с ионами металлов и образованием переходной зоны, отличающейся по своей физико-химической природе как от металла, так и от полимера.

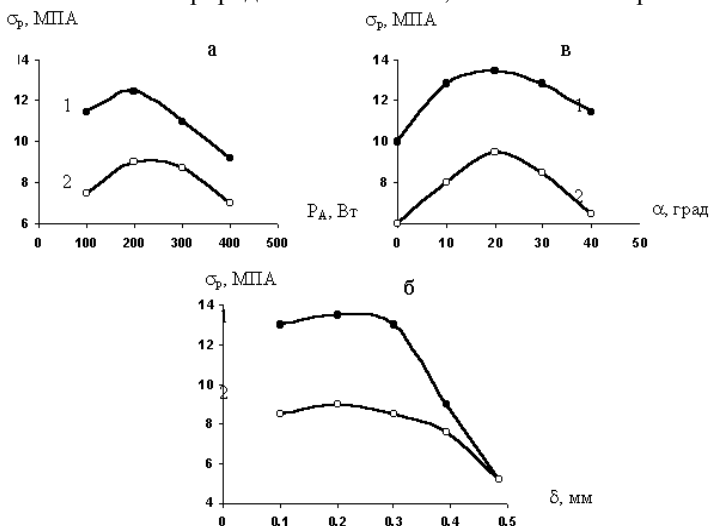


Рис. 8.58. Зависимости прочности соединений с полимером от электрической мощности (*а*), зазора между излучателем и деталью (*б*) и угла наклона излучателя (*в*): 1 – сплав Cd-Pb-Bi; 2 – сплав Wуда

Если металлизация синтетических материалов в УЗ поле происходит без физико-химического взаимодействия припоя с материалом, то прочность спая незначительна и определяется сугубо силами адгезионного взаимодействия.

Таблица 8.10

Максимальная адгезионная прочность сцепления УЗ металлизации сополимеров сплавами

Сплав	Температура плавления, °С	Адгезионная прочность, МПа				
		МСН	САМ	ПС-СУ	СТАН	СПС-С
Вуда Cd - Pb-Bi	343	9,5	9,3	8,5	8,3	7,6
	385	13,7	13,4	11,8	9,6	9,0

Анализ данных табл. 8.11 показывает, что для увеличения прочности сцепления УЗ металлизации необходимы подбор специальных припоев и оптимизация режимов с целью создания условий для химического взаимодействия компонентов припоя с синтетическим материалом.

Таблица 8.11

Адгезионная прочность сцепления припоя П200А с синтетическими материалами

Материал	Температура металлизации, °С	Прочность сцепления $\sigma_B \cdot 10^4$, Па	Характер отрыва
Фторопласт	352	Не свыше 5,0	Адгезионный
Феррит	350	66,6	Адгезионный
Органическое стекло	70	19,6	Адгезионный
Асботекстолит	300	93,1	Смешанный
Стеклотекстолит	150	78,4	Адгезионный

Металлизация неметаллических материалов (керамики, абразивов, ферритов, стекла, кварца) чистыми металлами (цинком, алюминием, серебром и др.) требует высоких рабочих температур (470–1100°С). Это обуславливает особые требования к конструкции ультразвукового излучателя и оборудованию для металлизации. Если процесс УЗ металлизации расплавом цинка еще может быть осуществлен с

использованием обычного излучателя при увеличении мощности нагревательного элемента или применении внешнего подогрева деталей до 460–470°C, то для высокотемпературных процессов алюминирования и серебрения обычное оборудование непригодно, рекомендуется изготавливать излучатель (концентратор и наконечник) из титана. С целью более эффективного охлаждения излучателя общая его длина должна быть увеличена за счет сменного наконечника до 1,0–1,5 длины волны. На боковой поверхности сменного наконечника необходимо выполнить прорези (воздушный радиатор) для охлаждения, более эффективно охлаждать преобразователь проточной водой. Детали нагревают в электропечи с температурой 1100–1150°C. Для этой цели могут быть применены инфракрасные печи с диффузными отражателями, обеспечивающие нагрев как металлизируемых деталей, так и наконечника волновода.

Применение в качестве припоев металлов с высокой температурой плавления повышает механическую прочность спаев с керамическими материалами. Как видно из табл. 8.12, прочность сцепления алюминиевых и серебряных покрытий, полученных УЗ металлизацией, превышает прочность керамики (20 МПа) и среднюю прочность спаев (в 3 раза) по покрытию, нанесенному вжиганием серебра.

Для УЗ металлизации поликристаллических сверхтвердых материалов–композита 02(β -BN) и гексаниа P(γ -BN) –применялись высокоплавкие припои на основе меди. Установлены интенсивное диспергирование поликристаллов в процессе металлизации при температуре 627–897°C, химическое взаимодействие контактирующих фаз в УЗ поле и заполнение расплавами поверхностных микротрещин поликристаллов. Металлизированные с помощью ультразвука поликристаллы плотных модификаций нитрида бора могут быть использованы в режущих инструментах [258].

Улучшение качества металлопокрытий на керамике, наносимых УЗ металлизацией, достигается применением защитной атмосферы. С этой целью используют герметическую камеру с остаточным давлением 10^{-2} Па, которая затем заполняется осушенным аргоном. Для улучшения прочности сцепления металлопокрытий с керамикой в расплав предварительно вводят в виде порошка 0,5–1,0% металла от массы расплава из группы тугоплавких металлов (Nb, Mo, W, Ti, Zr, Gr). Процесс высокотемпературной металлизации керамики осуществляют при температуре припоя 750°C и времени воздействия ультразвуковых колебаний до 1 мин. Амплитуда колебаний составляет 10–15 мкм, а зазор между изделием и излучателем находится в пределах 0,5–2,0 мм.

Излучатель выполняют из того же металла, который предварительно вводят в припой. Растворение металла излучателя в процессе высокотемпературной металлизации дополнительно повышает концентрацию вводимого элемента. Добавки тугоплавких металлов интенсифицируют процессы физико-химического взаимодействия припоя с керамикой, в результате чего адгезионная прочность покрытий возрастает до 4,4–5,4 МПа [259].

Металлизация пористых материалов, например графита, расплавами припоев под воздействием ультразвуковых колебаний позволяет обеспечить глубокое проникновение металла в поры материала за счет ультразвукового капиллярного эффекта, а также делает возможным получение новых композитных материалов. Металлизация и пропитка графита сплавами олова с магнием (1,5% Mg) и висмута с магнием (0,5% Mg) при амплитуде колебаний излучателя 10 мкм и длительности их воздействия 2 мин показали, что расплав проникает на всю толщину образца. Прочность сцепления поверхностного слоя металла с графитом превышает прочность графита [260].

Таблица 8.12

Прочность высокотемпературной металлизации различными металлами

Металл	Температура металлизации, °С	Рабочая температура конструкции, °С	Механическая прочность на разрыв, МПа
Цинк	450	250	19,6
Алюминий	700	450	20,0
Серебро	1100	700	20,0

Таким образом, УЗ высокотемпературные процессы металлизации обеспечивают не только высокую прочность спаев, но и создают предпосылки для получения новых материалов в технике. В качестве металлизующих покрытий при УЗМ в основном применяются низкотемпературные сплавы, образующие двойные, тройные или многокомпонентные системы (табл. 8.13) [261].

Исследован эффективный способ УЗ пайки электронных компонентов, который позволяет формировать столбики металла в припое, а также влияние параметров процесса ультразвуковой пайки, таких как частота УЗ колебаний, амплитуда, плотность металлических столбиков и припоя с помощью вязкоупругого моделирование [262].

Определяющими критериями качества паяного соединения были предел прочности и микроструктура. УЗ пайка проводилась с использованием столбиков из золота и меди (рис. 8.59).

Таблица 8.13

Параметры металлизации материалов в УЗ поле

Материал подложки	Материал покрытия	ξ , мкм	$\nu \cdot 10^{-3}$, м	$\delta \cdot 10^3$, м	α , град	Прочность, МПа
BT5-1	Sn-Zn	5,20	1,5	0,20	30	32 *
АМг6	---	5,65	1,5	0,15	40	94
ТБ	---	5,20	2,0	0,30	40	22
ТБК-3	---	5,20	2,0	0,30	40	20
НБС-1	---	5,20	1,8	0,25	30	14
ЦТС-19	---	5,55	2,0	0,30	35	25
ЦТС-23	---	5,20	2,0	0,30	35	21
ЦТБС-3	---	5,55	1,8	0,25	30	20
МСН	Cd-Bi-Pb	4,80	2,0	0,18	20	14
САМ	---	4,45	1,8	0,15	20	14
УПС	---	4,85	2,0	0,20	20	12
СТАН	---	5,00	2,0	0,15	25	09

* Гидропескоструйная обработка с последующим оксидированием.

Определяющим критерием паяного соединения был предел прочности. Применение ультразвука и локального нагрева позволило улучшить микроструктуру эвтектического сплава. Таким образом, можно сократить общее время воздействия температуры на электронную сборку, что важно при высокой плотности упаковки элементов.

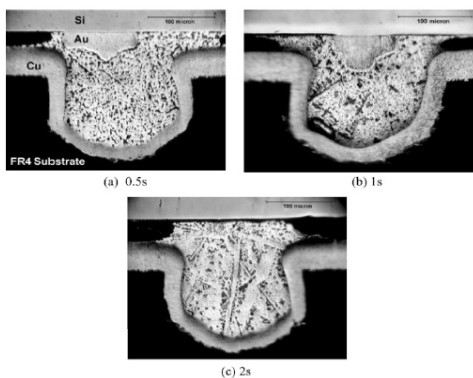


Рис. 8.59. Разрез золотого столбика для различного времени пайки

Экспериментальные результаты со столбиковым выводом меди показывают, что ограниченное нагревание достигнуто при использовании ультразвуковой пайки. Соединение Cu_3Sn не происходит из-за короткого времени соединения и низкой температуры припоя. В случае золотого столбикового вывода припой плавился за счет вязкоупругого нагревания и соединение $AuSn$ сформировывалось. Весь столбиковый вывод Au растворился в припое со временем соединения более 2 с, что может быть вызвано высокой температурой в малом объема припоя и активного воздействия ультразвука. Так как многочисленные соединения могут быть сформированы одновременно, и ввиду ограниченного нагрева метод УЗ пайки, применим к электронному корпусу с высокой плотностью упаковки.

При продольных УЗ колебаниях значительная часть энергии передается в паяемое изделие и расходуется на его нагрев и разрушение, а при колебаниях, распространяемых параллельно обрабатываемой поверхности, их энергия затрачивается на развитие кавитационных явлений вблизи зоны взаимодействия. При этом кавитационное давление в расплаве возрастает в среднем на 25%, увеличивая прочность сцепления металлизации с поверхностью не менее чем в 1,5 раза. Локальное введение энергии в зону взаимодействия предпочтительнее с точки зрения повышения производительности и уменьшения вредного воздействия на изделия [263].

Для процессов монтажа легкоплавкими припоями электронных устройств разработана установка (рис. 8.60), включающая УЗ генератор (УЗГ), ванну с припоем 1, акустическую систему на основе магнитострикционного преобразователя 2, электронные частотомер (ЭЧ) и вольтметр (ЭВ), контактный измеритель вибраций (ИВК) с пьезоэлектрическим датчиком амплитуды (ДА), блок контроля температуры (БКТ) с термопарой типа ХК, блок питания (БП) нагревателя ванны. Применение погружных излучателей в УЗ технологическом оснащении приводит к неравномерности кавитационных процессов в приповерхностном слое припоя из-за различия амплитуд УЗ вибраций в различных точках излучателя, что, как следствие, ведет к дефектам соединений. Для устранения этого недостатка была осуществлена девиация частоты с помощью блока управления частотой (БУЧ) УЗ генератора.

При этом происходит частичное уменьшение амплитуды в точках максимума (3-5 мкм) и значительное увеличение амплитуды (до 10 мкм) в точках минимума, выравнивается распределение амплитуды УЗ

вибраций по поверхности излучателя и уменьшается воздействие УЗ колебаний на ИЭТ. Оптимальные параметры процесса пайки: частота - 27,5 кГц, амплитуда - 12 мкм, ток подмагничивания - 5 А, температура припоя (ПОС 61) - 240 °С. Исследование прочности соединений от времени обработки и амплитуды при различных направлениях УЗ показало, что в случае параллельных колебаний она выше на 10–20 МПа, чем при продольных, а максимальная прочность наблюдалась при длительности УЗ колебаний 15–20 с и достигала 25 МПа [264].

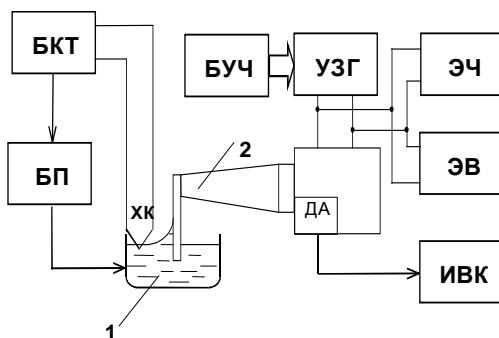


Рис. 8.60. Схема УЗ технологического оснащения пайки ИЭТ:
1 - ванна с припоем, 2 - погружной излучатель

Для оценки влияния электропереноса на прочность сцепления припоя с алюминиевым выводом ИЭТ зона взаимодействия припой–алюминиевый вывод исследовалась на растровом электронном микроскопе Stereoscan-360 (Cambridge Instruments, Англия), локальный рентгеноспектральный анализ элементного состава - на энергетическом спектрометре AN-10000 (Link, Англия). Пропускание импульсов электрического тока через зону взаимодействия при пайке изделий из алюминиевых сплавов в направлении от припоя в материал основания увеличивает ширину переходной зоны с 1,5 до 8 мкм за счет роста диффузионного взаимодействия соединяемых материалов и электромиграции электроподвижных атомов в припой. При обратном направлении тока ширина диффузионной зоны составляет 2 мкм, то есть практически не увеличивается, так как олово и свинец не обладает такой электроподвижностью, как алюминий [265].

Переходное сопротивление паяных соединений при флюсовой пайке составило 0,22 Ом, а при УЗ активации – в среднем 0,173 Ом в результате снижения числа дефектов, таких как поры, остатки флюсов и

другие. Переходное сопротивление паяных соединений медных контактов (рис. 8.61) уменьшается вначале на 60-70 %, а затем начинает увеличиваться, что объясняется протеканием диффузионных процессов между компонентами припоя и детали и улучшением процесса смачивания. Дальнейший рост переходного сопротивления происходит за счет интенсивного окисления компонентов припоя и основного металла, а также образования интерметаллидов [266-268]. Токсовая активация приводит к уменьшению переходного сопротивления для металлов, обладающих малым удельным сопротивлением и склонных к электромиграции, например для меди.

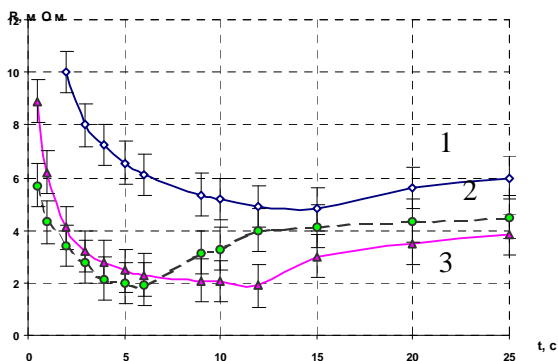


Рис. 8.61. Зависимости переходного сопротивления от времени пайки: 1 - обычная пайка, 2 - УЗ активация, 3 - УЗ и токсовая активация

Для обеспечения необходимого качества паяных соединений в современных электронных устройствах необходимо рациональное использование концентрированных потоков энергии УЗ и ЭМ полей, что обеспечит высокую прецизионность и регулируемость процессов, высокое качество монтажных соединений при экономном использовании материалов, энергии и высокой экологической чистоте процессов пайки электронной аппаратуры.

Глава 9. ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ПАЙКА СОЕДИНЕНИЙ

9.1. Особенности высокочастотного нагрева, выбор частоты нагрева

Воздействие энергии ЭМ поля высокой частоты на паяемые детали и припой проявляется в виде высокопроизводительного бесконтактного нагрева с помощью наведенных в металле вихревых токов. Наиболее важные преимущества ВЧ нагрева:

- энергия нагрева создается вихревыми токами непосредственно в изделии,
- возможны высокая плотность энергии и короткое время нагрева,
- локализация нагрева в пределах обрабатываемой зоны,
- возможность нагрева в любой среде, включая вакуум или инертный газ,
- высокая экологическая чистота нагрева,
- возможность использования электродинамических сил для улучшения растекания припоя, перемешивания расплава металла и т.д.

Основы применения ВЧ нагрева в России были заложены в 30–40-е годы В.П. Вологдиным, М.Г. Лозинским и Г.И. Бабатом [269–271], а в США – Э. Нортрапом [272]. Массовое применение в промышленности индукционный ВЧ нагрев получил во время второй мировой войны как наиболее эффективный процесс упрочнения сталей [273].

Индукционный нагрев основан на использовании трех известных физических явлений: электромагнитной индукции, открытой Фарадеем, эффекте Джоуля и поверхностном эффекте. Согласно закону электромагнитной индукции в проводящем теле, движущемся со скоростью V в направлении x через магнитное поле с магнитным потоком Φ , возникает индуцированное напряжение e :

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} - v \frac{d\Phi}{dx} . \quad (9.1)$$

Это напряжение вызывает в проводящем теле вихревые токи, которые генерируют электрическую мощность нагрева в соответствии с законом Джоуля:

$$P_v = \rho \cdot S^2 , \quad (9.2)$$

где S – плотность тока, ρ – электрическое сопротивление материала.

Выражение (9.1) показывает, что в индукционной нагревательной системе существуют два типа напряжения и вихревых токов. Первый тип вызван изменяющимся во времени магнитным потоком Φ , который

создается индуктором и проходит через неподвижное тело. Этот поток индуцирует напряжение и вихревые токи в проводящем теле как в короткозамкнутой обмотке трансформатора (рис.9.1).

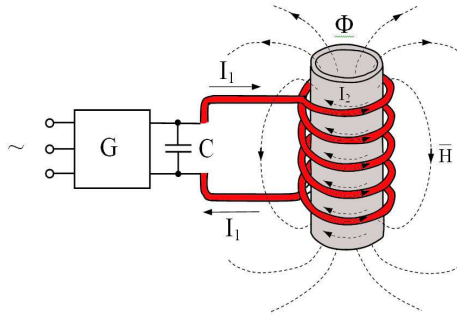


Рис.9.1. Схема индукционной системы нагрева

Второй тип индуцированного напряжения связан со скоростью V перемещения проводящего тела в неоднородном магнитном поле, при этом величина тока зависит от скорости перемещения тела. Такой вариант индукционного нагрева используется сравнительно редко. Согласно поверхностному эффекту плотность вихревых токов внутри проводящего тела подчиняется выражению:

$$S_x = S_0 \cdot \exp\left(-x/\delta\right) \quad , \quad (9.3)$$

где S_0 – значение плотности тока на поверхности, δ – глубина проникновения токов ВЧ.

Распределение мощности нагрева по толщине в соответствии с выражениями (9.2) и (9.3) имеет вид:

$$P_v = P_{v0} \cdot \exp\left(-2x/\delta\right). \quad (9.4)$$

Согласно выражению (9.4) до 86 % мощности нагрева создается в поверхностном слое проводящего тела толщиной δ . Глубина проникновения зависит от частоты тока f , удельного электрического сопротивления материала ρ и магнитной проницаемости μ :

$$\delta = \sqrt{\rho / \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu} \quad , \quad (9.5)$$

где μ_0 – магнитная постоянная поля.

Поскольку свойства нагреваемого материала зависят от температуры и интенсивности магнитного поля (для магнитных материалов), то

глубина проникновения также зависит от этих параметров и снижается с ростом частоты тока (рис. 9.2).

Расчет выделяемой в изделии мощности при индукционном нагреве достаточно сложен, однако для большинства практических применений эту мощность можно определить из следующего выражения [274]:

$$P = H^2 S \cdot K / \delta, \quad (9.6)$$

где S —площадь поверхности в нагретой зоне, K — фактор передачи, зависящий от формы и размеров тела.

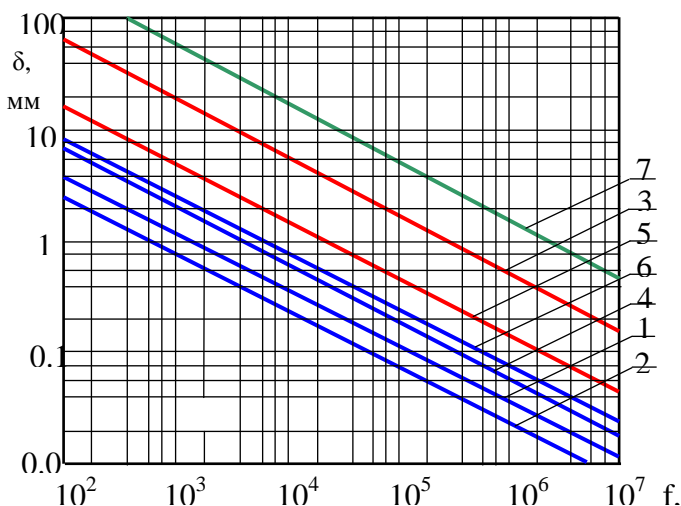


Рис. 9.2. Зависимость глубины проникновения от частоты для материалов: 1—сталь ($\mu=40$), 2—сталь ($\mu=100$), 3—сталь (800°C , $\mu=1$), 4—медь 5—медь (800°C), 6—алюминий, 7—графит

На рис. 9.3 приведены зависимости K для немагнитных тел в виде плат, цилиндров и труб от соотношения диаметра (толщины) и глубины проникновения.

Максимальные значения фактор передачи энергии принимает при ярко выраженном поверхностном эффекте, что в свою очередь обусловлено выбором частоты тока. В пределах глубины δ выделится 86,5% всей энергии [275]. Скорость нагрева по сравнению с паяльником увеличивается до 10 раз и в 100 раз с пайкой в печи, а область нагрева локализуется в пределах площади, определяемой конструкцией индуктора [276].

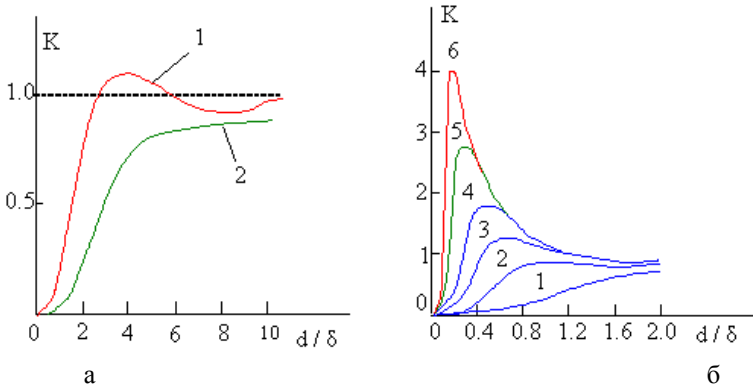


Рис. 9.3. Зависимости фактора K (а) плит (1) и цилиндров (2), (б) труб при h/d : 1–0,5; 2–0,2; 3–0,1; 4–0,05; 5–0,02; 6–0,01

При индукционном нагреве заметно сказывается влияние эффектов близости, кольцевого и концентрации магнитного поля. У двух проводников, расположенных рядом, обтекаемых током противоположного направления, наибольшая плотность тока наблюдается на сторонах, обращенных друг к другу. Вследствие кольцевого эффекта максимальная плотность тока будет на внутренней стороне проводника. Используя магнитопровод определенной конструкции можно создавать концентрацию силовых линий поля на заданной поверхности нагрева проводящего тела (рис.9.4) [277].

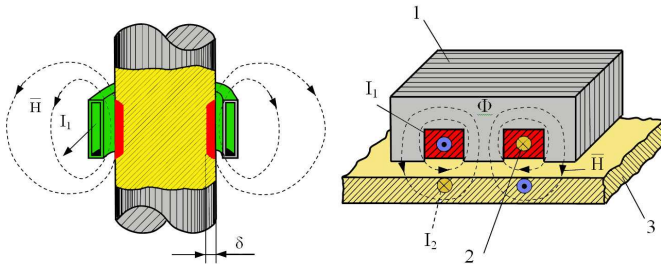


Рис. 9.4. Схема действия эффекта близости (а) и концентрации магнитного поля с помощью магнитопровода (б): 1–магнитопровод, 2–индуктор, 3–нагреваемое тело

ЭМ нагрев с помощью индукторов в диапазоне низких и УЗ частот 10 – 66 кГц при отношении глубины проникновения к толщине детали $\delta/h < 0,5-1,0$ требует значительных удельных мощностей (до 10^6 Вт/м²)

[271,278]. В этом диапазоне используют многovitковые индукторы, а преобразователи частоты мощностью до 30 кВт выполняют на силовых транзисторах [279]. Использование ВЧ диапазона 400–2000 кГц повышает локальность и избирательность нагрева, обеспечивает более высокие скорости подвода мощности, однако ввиду невысокого КПД индукторов (0,2–0,4) характеризуется удельной мощностью до 10^4 Вт/м², необходимостью водяного охлаждения индукторов, экранирования генераторов и индукторов [269]. Для пайки миниатюрных изделий используют частоту 27 МГц, на которой обеспечивают высокую локальность нагрева [280].

Дальнейшее повышение локальности и избирательности нагрева достигают с помощью магнитопроводов из феррита, устанавливаемых вблизи нагреваемых мест [277]. Воздействие мощного ЭМ поля на расплавленный припой вызывает его интенсивное перемешивание за счет вихревых токов и пондеромоторных сил, что улучшает смачивание и растекание припоя [281]. Качество соединения в процессах ВЧ пайки зависит от скорости, избирательности и локальности нагрева, его равномерности и регулируемости во времени [282, 283].

При пайке ИЭ, содержащих металлический корпус и размещенную внутри него подложку или плату с элементами, чувствительными к электрической составляющей поля, энергия ЭМ наводки должна быть много меньше энергии деградации элементов ИМС, которая составляет 10–15 мкДж [284]. На глубине, равной 4δ , напряженность поля будет ослаблена в 100 раз и на порядок ниже напряженности наводок, приводящих к деградации внутренних элементов. Таким образом, выбор нижней частоты осуществляют из условия [285] $\delta \leq h/4$, где h – толщина корпуса, а верхняя частота вытекает из требования максимальной величины термического КПД ВЧ нагрева, при котором $\delta > h/8$ [283]:

$$4 \cdot 10^{-6} \rho / (\mu h^2) < \Delta f < 16 \cdot 10^{-6} \rho / (\mu h^2). \quad (9.8)$$

Этим условиям удовлетворяет диапазон частот 400–2000 кГц. При ВЧ пайке корпус ИЭ устанавливают в теплоотводящую оправку, крышку прижимают к корпусу с усилием 1 – 3 Н с помощью защитного медного экрана, а индуктор размещают на расстоянии 2 – 3 мм от крышки [286].

9.2. Способы и устройства высокочастотного нагрева

Существует большое разнообразие конструкций индукционных нагревательных устройств [276, 277]. Для сквозного нагрева

проводящих тел круглого, квадратного и прямоугольного сечения применяют индукторы соленоидального типа (рис.9.1), плоских тел – индукторы с магнитопроводом (рис.9.4) или в виде плоской спирали (рис.9.5). Для нагрева колец, небольших плат, проводов используют индукционные устройства с замкнутой и разомкнутой магнитной цепью (рис.9.6).

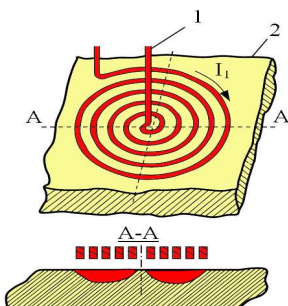


Рис. 9.5. Индуктор в виде плоской спирали: 1– индуктор, 2– нагреваемое тело

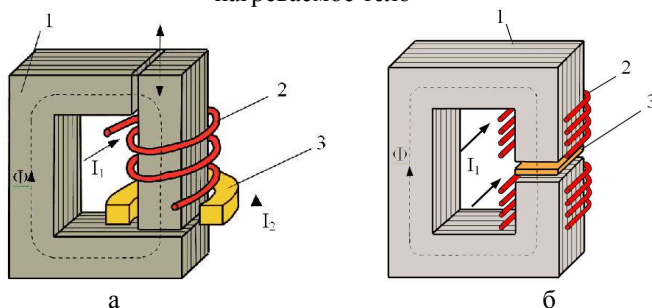


Рис. 9.6. Индукционные системы с замкнутой (а) и разомкнутой (б) магнитной цепью: 1–магнитопровод, 2–индуктор, 3–нагреваемое тело

Качество паяных соединений в индукционных нагревательных системах зависит от следующих факторов ВЧ нагрева: времени, скорости, площади зоны нагрева, плотности мощности и др. Эффективность нагрева определяется электрофизическими свойствами материалов, частотой тока и конструктивными параметрами индукционных устройств.

Совершенствование устройств ЭМ нагрева направлено на увеличение напряженности поля в рабочей зоне и уменьшение ее неравномерности по ширине нагреваемого участка, что достигается расположением витков

индуктора в одной плоскости, применением магнитопроводов из феррита и др. [287]. Варьированием числом и расположением витков индуктора можно локально влиять на интенсивность подводимой энергии. Как правило, подводимая электрическая мощность регулируется ступенчато до достижения оптимальной величины удельной мощности нагрева детали. С помощью пирометра автоматизируют процесс нагрева так, что ЭМ энергия при достижении предварительно выбранной температуры выключается или подводится прерывисто, благодаря чему можно поддерживать температуру в узком диапазоне. Такое совершенное управление температурой и временем ее подъема свойственно лишь бесконтактным методам нагрева ЭМ полем.

Поскольку нагрев в ЭМ поле отличается высокой скоростью, то особое значение приобретает дозирование нагрева во времени. Для управления процессами ЭМ нагрева программируют напряжение на индукторе с точностью до 1 % [288]. При пайке пьезоэлектрических преобразователей, чувствительных к нагреву свыше 210⁰С, нагрев выполняют импульсами ЭМ энергии длительностью 2 – 7 с, чтобы температура пайки не превысила заданную [289].

Если в зоне нагрева образовать короткозамкнутый контур с малым электрическим сопротивлением, расположенный в зоне формирования соединения [290], то скорость ВЧ нагрева растет пропорционально отношению электрических сопротивлений детали R_{δ} и контура R_{κ}

$$\frac{R_{\delta}}{R_{\kappa}} = \sqrt{\frac{\rho_{\mu}}{\rho_{\kappa}}}, \quad (9.8)$$

где ρ_{κ} – удельное электрическое сопротивления материала контура.

При образовании контура из медного покрытия толщиной, соизмеримой с глубиной проникновения поля, скорость нагрева увеличивается до 10 раз.

Повышение равномерности и эффективности ВЧ нагрева многовыводных разъемов достигнуто соединением выводов разъема проводником с высокой электропроводностью таким образом, чтобы в зоне нагрева образовывался электрически замкнутый контур [291]. Штыревые выводы 1 разъема 2 вставляли в металлизированные отверстия 3 МПП 4 и снабжали их дозированными кольцами припоя 5. Выводы разъема размещали внутри 2-х виткового индуктора 6 и электрически соединяли проводником 7 (рис. 9.7). При ВЧ нагреве с использованием генератора ВЧИ-4-10 в режиме: $I_a = 1,0$ А, $I_c = 0,2$ А

время пайки составило 10 – 15 с, что в 2 раза меньше, чем при обычном нагреве. В результате концентрации ЭМ поля в зоне расположения электрического контура увеличивается скорость и равномерность нагрева, уменьшается рассеяние ЭМ энергии.

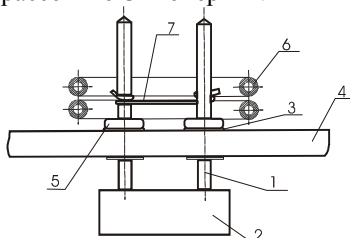


Рис. 9.7. Схема ВЧ пайки с электрическим соединением выводов разъема

Воздействие мощного ЭМ поля на расплавленный припой вызывает его интенсивное перемешивание за счет вихревых токов и пондеромоторных сил, что улучшает смачивание и растекание припоя по паяемым поверхностям деталей [292].

При воздействии ЭМ поля на расплавы в индукционных тигельных печах возникает эффект перемешивания, так как расплав испытывает радиальное давление (сжатие), вызванное взаимодействием токов индуктора и расплава. Под влиянием этого давления происходит подъем уровня расплава на высоту h отношению к уровню краев (создается мениск), расплав стекает вдоль поверхности мениска и тигля и поднимается снова вдоль массы металла (рис.9.8). Величина электромагнитного давления на расплав $F_{эм}$ выражается формулой:

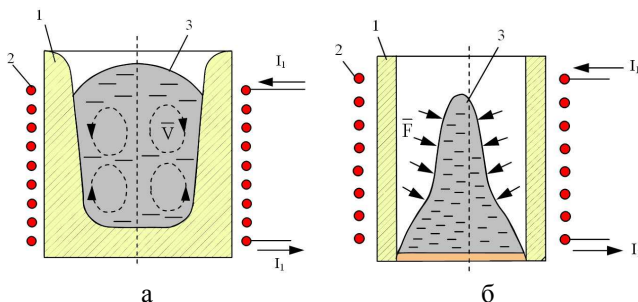


Рис.9.8. Перемешивание расплава в тигле при воздействии ЭМ поля: на низких (а) и высоких (б) частотах

$$F_{эм} = \mu\mu_0 H^2 / 4. \quad (9.9)$$

Удельная мощность высокочастотного нагрева зависит от электрофизических характеристик материала и частоты тока f :

$$P_{y\partial} = kH^2 \sqrt{\rho\mu f}, \quad (9.10)$$

где k – размерный коэффициент.

Таким образом, анализ выражений (9.9) и (9.10) показывает, что при одной и той же удельной мощности нагрева, понижение частоты сопровождается увеличением напряженности магнитного поля и большим электромагнитным давлением на расплав. Высота подъема расплава определяется [274]:

$$h = \frac{F_{эм}}{\gamma} \cdot 10^3 = \frac{2\pi}{9,81\gamma} H^2 \cdot 10^4 = \frac{P_{y\partial}}{9,81\gamma} \sqrt{\frac{10}{\rho f}}, \quad (9.11)$$

где γ – удельный вес металла, P_c – удельная мощность.

Расчеты показывают, что при удельной мощности нагрева, равной 10^6 Вт/м² высота подъема расплава металла зависит от частоты тока. Понижение частоты до 66 кГц увеличивает интенсивность электромагнитного перемешивания, а ее увеличение – уменьшает. Совместное действие ВЧ поля и электродинамических сил улучшает смачивание и растекание припоя при формировании соединений [293].

ВЧ нагрев в вакууме в сочетании с воздействием УЗ полем позволяет получать вакуумно-плотные паяные соединения деталей из нержавеющей и высокотемпературных сталей. При ВЧ пайке телескопических соединений в одном из элементов возбуждают УЗ крутильные колебания с помощью двух акустических волноводов [79]. Недостатком такого способа является сложность конструкции установки, работающей в условиях вакуума.

Для увеличения площади растекания припоя предложено воздействовать на него пондеромоторными силами в процессе ВЧ нагрева. Для этого в зоне нагрева образуют электрически замкнутый контур, в котором наводят вихревые токи той же частоты что и в индукторе [294]. Сила, возникающая при взаимодействии ЭМ поля и вихревого тока I в проводнике длиной l , имеет направленное действие (рис. 9.9) и определяется по формуле

$$F = BI l, \quad (9.12)$$

где

$$B = \frac{U_m}{4.44 S_C f w}, \quad (9.13)$$

где U_m – амплитуда напряжения, S – площадь магнитопровода, w – число витков.

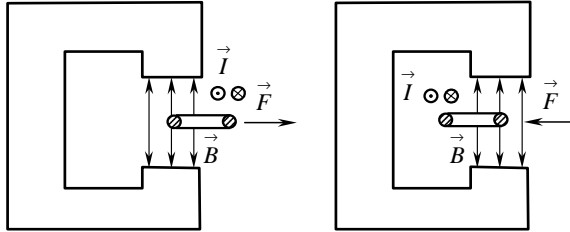


Рис. 9.9. Схема взаимодействия проводника с током в ЭМ поле

Для увеличения коэффициента растекания припоя необходимо, чтобы давление $P_{эм}$, создаваемое на расплав припоя силой F , превосходило давление сил поверхностного натяжения припоя:

$$\frac{P_{эм}}{P_s} = \frac{Bl}{\sigma \pi D} \quad (9.14)$$

Появление пондеромоторной силы \vec{F} в направлении увеличения площади растекания на поверхности твердого тела вызывает поверхностное натяжение $\sigma_{эм}$:

$$Bl = \sigma_{эм} 2l, \quad (9.15)$$

откуда

$$\sigma_{эм} = Bl/2.$$

Появление поверхностного натяжения, вызванного действием пондеромоторных сил, вносит изменения в равновесие сил поверхностного натяжения на межфазных границах:

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{1,3} + \sigma_{эм} - \sigma_{2,3}}{\sigma_{1,2}} \quad (9.16)$$

Отношение коэффициентов растекания припоя в ЭМ поле и без него имеет следующий вид [295]:

$$\frac{K_p}{K_{p0}} = 1 + \frac{\sigma_{эм}}{(1 + \cos\theta)\sigma_{1,2}} \quad (9.17)$$

Для моделирования вводим следующие граничные условия: в условиях полной смачиваемости припоем $\cos\theta = 1$; $\sigma_{1,2} = 0,5$ Н/м;

$B = 0,4$ Тл, а величина индуцированного тока изменяется в пределах от 0 до 10 А. Моделирование роста коэффициента растекания припоя под действием пондеромоторных сил с помощью MathCad 7.0 при $B = 0,4 - 0,8$ Тл, $I = 2,5 - 10$ А, показало, величина роста линейно зависит как от напряженности поля, так и от величины тока, индуцированного в припое (рис. 9.10). Моделированием при $B = 0,4$ Тл, $I = 5$ А, $D = 1 \cdot 10^{-2}$ м установлено, что коэффициент растекания припоя за счет сил ЭМ давления может возрасти в 1,25 – 1,3 раза.

Для повышения качества паяных соединений за счет увеличения площади растекания припоя и более полного заполнения им капиллярных зазоров в соединении, предложено сочетать нагрев изделий и припоя энергией ЭМ поля в зазоре магнитопровода индуктора с воздействием механических вибраций. С момента расплавления припоя до завершения его растекания паяемому изделию сообщали низкочастотные вибрации путем подачи переменного тока подмагничивания частотой 50–400 Гц и амплитудой 1–10 А в индуктирующую обмотку [296]. Амплитуда вибраций пропорциональна величине тока подмагничивания, магнитной проницаемости материала детали, длине незакрепленной части детали и составляла 0,5–5 мм для тока подмагничивания 1–10 А.

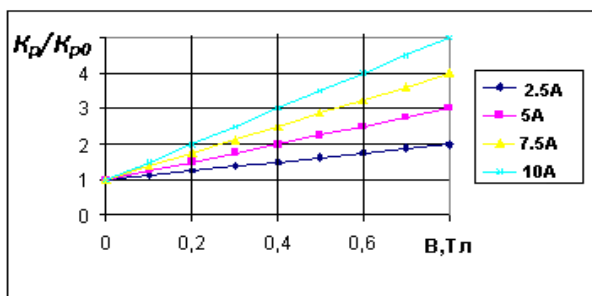


Рис. 9.10. Зависимости отношения коэффициентов растекания припоя от напряженности магнитного поля и величины тока

Направление вибраций деталей устанавливали таким образом, чтобы они совпадали с направлением вектора средней скорости течения припоя в паяемый зазор, что достигается соответствующей ориентацией изделия в магнитопроводе индуктора.

Устройство (рис. 9.11) содержало магнитопровод 1 с индуктирующей обмоткой 2, источник тока НЧ 3, генератор 4, пульт управления 5. Паяемые детали 6 размещали с помощью диэлектрической кассеты 7 в зазоре магнитопровода. Дроссель Др и резистор R обеспечивали электрическую развязку цепей средней и низкой частот. Пульт управления коммутировал генератор 3 и источник 4 к обмотке с помощью переключателей S1 и S2. Нагрев в зазоре магнитопровода осуществляли при замкнутом переключателе S1 путем подачи электрических колебаний от генератора 4 в индуктирующую обмотку 2 и возбуждении ЭМ поля в зазоре.

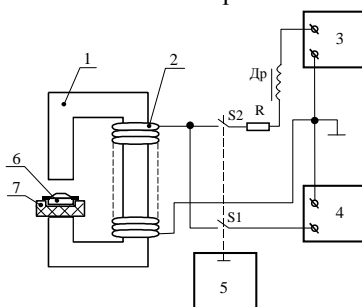


Рис.9.11. Схема ЭМ нагрева с возбуждением вибраций в изделии

Амплитуда вибраций пропорциональна величине тока подмагничивания, магнитной проницаемости материала детали и составляет 0,5–5,0 мм. Направление вибраций деталей устанавливают таким образом, чтобы они совпадали с направлением вектора средней скорости течения припоя в паяемый зазор, что достигалось соответствующей ориентацией изделия в магнитопроводе индуктора. НЧ вибрации вызывают измельчение и равномерное распределение растворимых в припое примесей, удаление флюсовых и газовых включений из капиллярных зазоров, что приводит к снижению вязкости расплавленного припоя и более полному заполнению капиллярных зазоров в соединении. Устранение посторонних включений и увеличение сплошности паяного шва увеличивает механическую прочность, а устранение возможности образования интерметаллических соединений обеспечивает низкое переходное сопротивление.

Амплитуда НЧ вибраций паяемых деталей регулировалась изменением амплитуды переменного тока подмагничивания. Увеличение амплитуды тока подмагничивания свыше 10 А вызывало значительные вибрации деталей, что нарушало геометрию паяного соединения и увеличивало тепловые потери в индуктирующей обмотке.

Пондеромоторные силы в расплаве припоя возбуждали с помощью устройства (рис. 9.12,а), состоящего из генератора G и источника импульсов тока ИП. Изделие 1 и припой 2 в виде дозированной заготовки нагревали энергией ЭМ поля в зазоре магнитопровода 3 и пропускали импульсы электрического тока через расплав припоя с помощью токовыводов 4 в направлении, перпендикулярном вектору индукции магнитного поля, с одновременным вращением изделия вокруг собственной оси с частотой ω [297]. Пондеромоторные силы действовали в расплаве припоя в направлении, перпендикулярном вектору электрического тока, а вращение изделия обеспечивало равномерное растекание припоя.

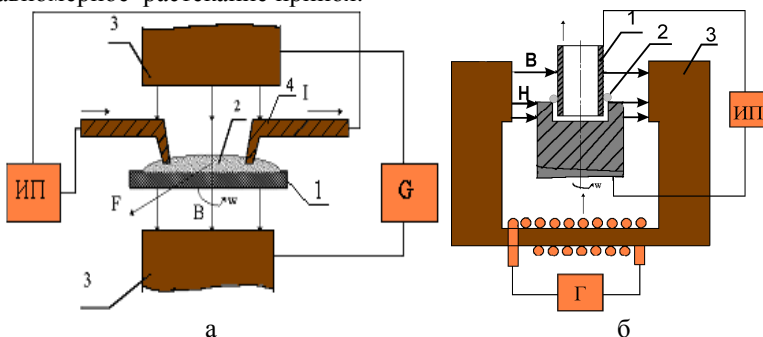


Рис. 9.12. Схемы совместной активации ЭМ энергии и электрическим током

Для телескопических соединений схема устройства (рис. 9.12,б) отличалась лишь конструкцией токовыводов. Соединяемые детали 1,1' и припой 2 в форме кольца располагали в зазоре магнитопровода 3 с обмоткой 4. Детали подключали к источнику тока, который протекал через расплав после расплавления кольца припоя и затекания его в зазор между деталями. Возникающие пондеромоторные силы $F=H \cdot I$, которые, действуя в плоскости изделия в направлении, перпендикулярном вектору электрического тока, обеспечивали увеличение глубины проникновения припоя в капиллярный зазор, а вращение деталей вокруг оси создавало условие для равномерного

заполнения припоем соединительного зазора. Для эффективного принудительного растекания расплава припоя необходимо, чтобы пондеромоторная сила превышала силу поверхностного натяжения на границе твердое тело - расплав припоя, что выполнялось при напряженности переменного магнитного поля более 0,5 Тл и величине постоянного электрического тока более 1 А.

Вращение изделия вокруг оси создавало пондеромоторное натяжение $\sigma_n = F/L$, где L - длина окружности расплава припоя, которая растягивала дозированную навеску припоя равномерно по поверхности изделия. Скорость вращения изделия зависела от времени и выбиралась таким, чтобы изделие совершало 2–3 оборота за время пайки.

Для повышения качества паяных соединений и улучшения смачивания паяемых поверхностей предложено ВЧ колебания в диапазоне 100 – 1000 кГц модулировать УЗ сигналом частотой 16–66 кГц от внешнего источника - УЗ генератора с глубиной модуляции 20 – 100% [295]. Модулированные ВЧ колебания создают в припое силы электромагнитного давления F , величина которых пропорциональна квадрату напряженности магнитного поля H :

$$F = \frac{\kappa H^2}{\sqrt{\rho \cdot f}}. \quad (9.19)$$

За счет введения ферромагнитного сердечника внутрь индуктора концентрируют переменное магнитное поле в зоне пайки до напряженности 30–50 А/м и создают ЭМ давление в припое до 10^4 Вт/м². Возникающее в припое переменное давление УЗ частоты вызывает развитие кавитационных явлений и микропотоков в припое и интенсифицирует процесс смачивания паяемых поверхностей. При ВЧ пайке электронно-вакуумных приборов в вакууме 10^{-4} Тор припоем ПСрМИн-63В при температуре 800⁰С в течение 10 – 20 с глубиной УЗ модуляции величиной 80% обеспечивала непрерывный паяный шов. Увеличение глубины модуляции до 100% повысило коэффициент растекания припоя в 2 раза.

Модуляция ВЧ напряжения сигналом частотой 0,05 – 100 кГц при глубине модуляции 10 – 100% вызывает в паяемых деталях низкочастотные вибрации амплитудой [293]

$$A = \frac{\kappa P_{\kappa m}}{100\sqrt{c \cdot f}}, \quad (9.20)$$

где P_{κ} – колебательная мощность ВЧ генератора, m - глубина модуляции.

При пайке рамки корпуса микросборки из титанового сплава ВТ-5 к керамической плате с толсто пленочной металлизацией ВЧ колебания модулировались частотой 250 Гц и амплитудой 150 В от генератора НЧ в течение 5 с при глубине модуляции 60%. Качество соединений оценивалось в зависимости от частоты сигнала и глубины модуляции (табл.9.1). Сокращение времени пайки и повышение качества соединений достигнуто при глубине модуляции ВЧ колебаний на уровне 60%. Колебания паяемой детали амплитудой 0,1 – 1,0 мм с момента расплавления припоя и в течение времени пайки 3 – 10 с приводят к разрушению окисных пленок на припое и улучшению процесса смачивания припоем паяемых поверхностей.

Таблица 9.1

Зависимость качества паяного шва от глубины модуляции

Частота модуляции, кГц	Время пайки (с) при глубине модуляции, %				Качество паяного шва
	10	30	60	100	
0,05	7,5	7,0	6,5	6,8	Удовлетворит. Хорошее - “- - “-
0,1	7,0	6,3	5,5	5,0	
1,0	7,5	7,2	6,0	6,5	
10,0	8,5	8,0	7,5	7,5	Удовлетворит.
50,0	10,5	10,0	8,5	8,0	

Таким образом, реализован бесконтактный ввод УЗ колебаний при ВЧ нагреве, что способствует формированию качественных паяных соединений за счет полного заполнения швов в соединениях.

Повышение качества паяных соединений и улучшение смачивания паяемых поверхностей достигают модуляцией ВЧ колебания в диапазоне 100 – 1000 кГц низкочастотным сигналом 18 – 66 кГц от внешнего источника с глубиной модуляции 20 – 100% (рис. 9.13). Схема содержит источник 1 НЧ колебаний, ВЧ генератор 2, индуктор 3, паяемые детали (рамку 4 и подложку 5 с толсто пленочной металлизацией), устройство управления 6 и пирометр 7. Бесконтактный ввод УЗ колебаний при ВЧ нагреве способствует формированию качественных паяных соединений за счет полного заполнения швов в соединениях.

При ВЧ нагреве важно оперативно регулировать скорость нагрева так, чтобы паяемые детали и припой одновременно достигали температуры пайки. На индуктор подают ВЧ напряжение и нагревают изделие (участок I на рис. 9.14).

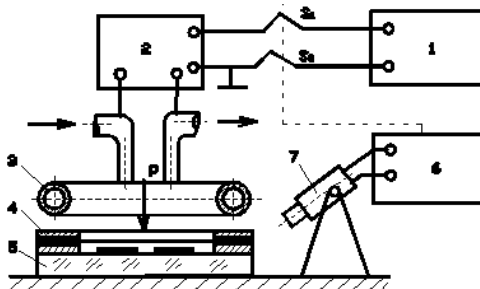


Рис. 9.13. Схема совместного действия энергии ВЧ и НЧ колебаний

После расплавления припоя (точка а) снижают интенсивность ВЧ нагрева в зависимости от требуемого температурного режима процесса пайки (участок II), что позволяет избежать перегрева припоя, а также снизить нагрев изделия. Затем ВЧ напряжение отключают и изделие охлаждают (точка b, участок III).

Для эффективного регулирования скорости ВЧ нагрева в электрическую цепь индуктора 1, охватывающего нагреваемый объект 2, предложено включить два индуктивных контура 3 и 4, расположенные на общем основании 5, снабженном ферромагнитным сердечником 6 (рис.9.15) [298]. Увеличивая магнитную связь между контурами с помощью сердечника, снижали тем самым скорость нагрева после достижения температуры плавления припоя в 1,5 – 2,5 раза и обеспечивали “мягкий режим” формирования контактных соединений. Это позволяет избежать перегрева припоя, а также снизить нагрев термочувствительного изделия.

Для пайки рамки 1 к плате микросборки 2 разработано устройство (рис. 9.16), содержащее прижим 3, индуктор 5, кассету 4, теплоизолирующую плату 6 [299]. Расположение индуктора под платой исключает случайное прикосновение к нему в процессе пайки, перемещение кассеты может быть автоматизировано с помощью транспортного устройства. Нижнее расположение индуктора отличается более пологой характеристикой нагрева, что исключает перегрев БИС, а также прикосновение к индуктору, что повышает безопасность в работе.

Для повышения качества контактных соединений при ВЧ пайке многовыводных разъемов в металлизированные отверстия МПП поверхность платы, обращенную к индуктору, охлаждают химически нейтральной жидкостью, например, спиртоглицериновой смесью [300]. Жидкость, обволакивая участки пайки, защищает припой от окисления и снижает нагрев платы. При нагреве от генератора ВЧИ4-10 в режиме:

$I_a = 1,5 - 2 \text{ A}$, $I_c = 0,25 - 0,35 \text{ A}$ время пайки не более 15 – 20 с, а нагрев платы не превышал 60 – 70°C.

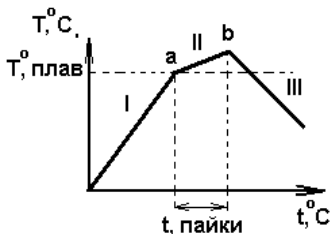


Рис. 9.14. Температурный профиль ВЧ нагрева

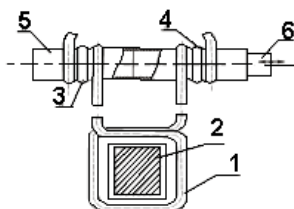


Рис. 9.15. Схема регулировки скорости ВЧ нагрева

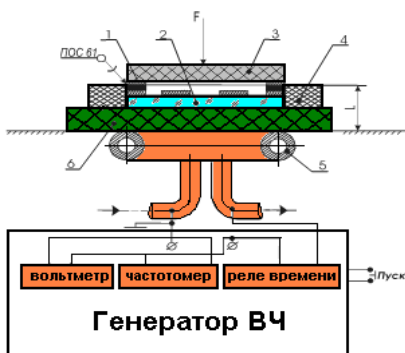


Рис. 9.16. Устройство ВЧ пайки микросборок

Используя физические закономерности активации энергией ЭМ поля, можно обеспечить высокопроизводительный бесконтактный нагрев ИЭ с помощью вихревых токов, активировать расплавленный припой и улучшить тем самым его смачивание и растекание по паяемым поверхностям и тем самым повысить качество контактных соединений.

9.3. Моделирование и оптимизация параметров ВЧ нагрева

Ориентировочно удельную мощность ВЧ нагрева определяют в зависимости от толщины нагретого слоя h и изменения температуры нагрева изделия [269]:

$$P_{\text{уд}} = \kappa \Delta T/h. \quad (9.16)$$

При расчете принимают во внимание лишь тот объем, который фактически должен нагреваться до температуры пайки. Поскольку в процессах пайки оловянно-свинцовыми припоями температура нагрева 240 – 300 °С, толщина слоя 5 – 10 мм, то удельная мощность составит $(150\text{--}300) \cdot 10^4$ Вт/м². При более точных расчетах необходимо учитывать потери тепла вследствие излучения, конвекции и теплопроводности, а также характеристики материалов и индукторов. КПД нагрева кругового индуктора зависит от физических характеристик материалов и глубины проникновения тока [283]:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{D_{\text{и}}^2}{D_{\text{д}}^2} \cdot (1 + 6,25 \cdot \frac{\delta^2}{D_{\text{д}}^2}) \cdot \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu \cdot \rho_2}}}, \quad (9.17)$$

где $D_{\text{и}}$ и $D_{\text{д}}$ – диаметры индуктора и детали, ρ_1 – удельное электрическое сопротивление индуктора.

При условии $D_{\text{и}} \approx D_{\text{д}}$, а $\delta \approx 0,1D_{\text{д}}$ получим:

$$\eta = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu \cdot \rho_2}}}. \quad (9.18)$$

Чем большие значения ρ_2 и μ нагреваемого материала, тем выше КПД (для стали 0,7–0,8, для меди и ее сплавов 0,5–0,6). Такая формула дает приближенную оценку КПД ВЧ нагрева, что приемлемо для крупногабаритных деталей конструкций ИЭ. В общем случае КПД ВЧ нагрева определяется соотношением электрических сопротивлений индуктора $R_{\text{и}}$ и материала детали $R_{\text{д}}$:

$$\eta = \frac{R_{\text{д}}}{R_{\text{д}} + R_{\text{и}}} = \frac{1}{1 + R_{\text{и}} / R_{\text{д}}}. \quad (9.19)$$

Мощность, выделяемая в зоне ВЧ нагрева:

$$P_{\text{н}} = \frac{U_{\text{эф}}^2 \eta \cos \varphi}{R_{\text{н}}}, \quad (9.20)$$

где $U_{эф}$ – эффективное напряжение на индукторе, R_H – электрическое сопротивление токам ВЧ в зоне нагрева, $\cos\varphi$ – коэффициент мощности.

Электрическое сопротивление токам ВЧ с учетом глубины проникновения зависит от фактора $\sqrt{\rho_2\mu}$ и частоты тока [73]:

$$R_H = \frac{2\rho L_H \sqrt{c_2 \cdot m \cdot f}}{h}, \quad (9.21)$$

где L_H – периметр, h – ширина зоны нагрева.

Тогда мощность ВЧ нагрева в зазоре магнитопровода

$$P_H = \frac{U_{эф}^2 H \cos\varphi}{2\pi L_H \sqrt{\rho_2 \cdot \mu \cdot f} \left(1 + \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu \cdot \rho_2}}\right)}. \quad (9.22)$$

Напряженность магнитного поля в зоне нагрева индукторов различного типа можно оценить с помощью индуктивного зонда [301], с длиной стороны a , присоединенного к электронному вольтметру. Известную формулу для H преобразуем к удобному виду:

$$H = \frac{1,26 \cdot U(B)}{f(MГц) \cdot a^2(мм)} \cdot 10^5 \text{ А/м}. \quad (9.23)$$

Напряженности магнитного поля в зазоре магнитопровода (1,2) сечением 4 см^2 на низкой частоте и в индукторе кругового типа на частоте 1 МГц (3,4) линейно зависят от мощности (рис. 9.17). Влияние тока подмагничивания на низких частотах не существенно, для индуктора без магнитопровода напряженность поля меньше в 3 раза.

Эффективное напряжение на индукторе зависит от типа ВЧ генератора изменяется в пределах 100 – 800 В в зависимости от требуемой мощности нагрева. Теоретические зависимости для мощности, выделяемой в зоне нагрева по формуле (9.23), выполненные с помощью MathCad 7.0 для: $f = 22 \text{ кГц}$; $\cos\varphi = 0,5$; $W = 25$ витков; $L_H = 0,05 \text{ м}$; $h = 0,02 \text{ м}$ и различных металлов, приведены на рис. 9.18. Магнитные материалы при прочих равных условиях требуют меньшей мощности ВЧ нагрева. Схема ВЧ нагрева для пайки соединений телескопического типа круговым индуктором приведена на рис. 9.19. Для кругового индуктора характерна увеличенная зона нагрева, определяемая числом витков, а коэффициент мощности зависит от величины зазора между деталью и индуктором, глубины проникновения токов и магнитной

проницаемости материала детали:

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + (1 + \sqrt{2} \cdot \frac{h}{\delta \cdot M})^2}} \quad (9.24)$$

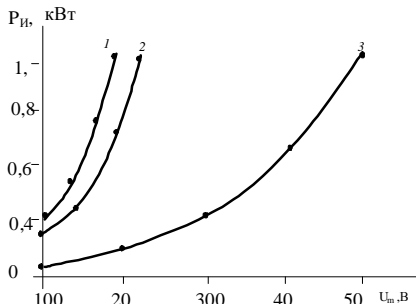
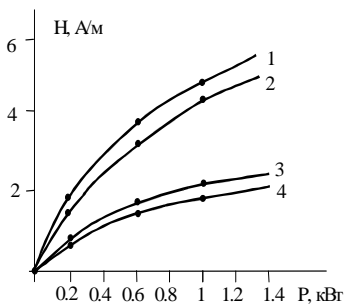


Рис. 9. 17. Зависимости напряженности поля от мощности нагрева при токах подмагничивания 1 – 15А и 2 – 6А, для 3– магнитных, 4 – диамагнитных материалов

Рис. 9.18. Зависимости мощности нагрева от напряжения на индукторе: 1 – медь, 2 – алюминий, 3 – сталь

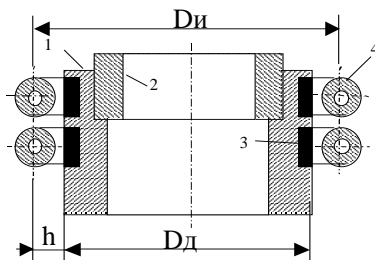


Рис. 9.19. Схема ВЧ нагрева круговым индуктором: 1, 2 – детали, 3 – зона нагрева, 4– индуктор

Учитывая выражение для глубины проникновения δ , получим:

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + (1 + \sqrt{2} \cdot M_0 \cdot h \cdot \sqrt{\frac{f}{c_\delta \cdot M}})^2}} \quad (9.25)$$

При увеличении зазора h от 1 до 10 мм коэффициент мощности для диамагнетиков падает почти в 10 раз, а для ферромагнетиков уменьшается в 3 – 4 раза (рис. 9.20,а). Поэтому для диамагнитных материалов необходимо уменьшить величину зазора до значений, обеспечивающих нормальную работу индуктора.

Поскольку ток ВЧ в круговом индукторе протекает в основном в слое глубиной δ_u , а длина индуктора зависит от его диаметра D_u и числа витков N , то электрическое сопротивление индуктора равно:

$$R_u = \frac{\rho_u \pi D_u N}{\pi \cdot d_u \delta_u} = \frac{ND_u \sqrt{\rho_u \cdot \mu_0 \cdot f}}{d_u}, \quad (9.26)$$

где d_u – диаметр трубки индуктора.

Для маловитковых индукторов необходимо учитывать также активное сопротивление токоподвода $R_{ТИ}$ индуктора, по величине сравнимое с R_u [302]:

$$R_{ТИ} = 2\rho_u \frac{L_{ТИ}}{\pi \cdot d_u \delta_u}. \quad (9.27)$$

С учетом выражения для δ получим:

$$R_{ТИ} = 2L_{ТИ} \frac{\sqrt{\rho_u \mu_0 f}}{\pi \cdot d_u}. \quad (9.28)$$

Подставив значения констант:

$$R_{ТИ} = 0,1L_{ТИ} \frac{\sqrt{f}}{d_u}, \quad (9.29)$$

Тогда КПД ВЧ нагрева составит:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{R_u + R_{ТИ}}{R_\delta}} = \frac{1}{1 + \frac{(0,15ND_u + 0,1L_{ТИ}) \cdot \sqrt{f}}{R_\delta \cdot d_u}}. \quad (9.30)$$

Моделирование ВЧ нагрева для различных магнитных материалов в зависимости от диаметра нагреваемой детали показало, что

максимальные значения КПД на уровне 0,9–0,95 достигнуты при значениях $D_\delta < 0,01$ м (рис. 9.20,б).

Электрическое сопротивление токам ВЧ в зоне нагрева определено из предположения, что ширина зоны нагрева при малых величинах зазора h определяется проекцией диаметра индуктора, а длина – кольцом длиной πND_δ :

$$R_\delta = \frac{\rho_\delta N \pi D_\delta}{d_u \delta}. \quad (9.31)$$

С учетом выражения для δ получим:

$$R_\delta = \frac{\pi N D_\delta}{d_{II}} \sqrt{\frac{\rho_\delta}{\mu_0 \rho f}}. \quad (9.32)$$

Электрическое сопротивление в зоне ВЧ нагрева линейно снижается с уменьшением числа витков индуктора и диаметра детали. Итоговое выражение для мощности ВЧ нагрева имеет вид:

$$P_H = \frac{U_{эф}^2}{\sqrt{\left(1 + (1 + \sqrt{2\mu_0} h \sqrt{\frac{f}{\rho_\delta \mu}})^2\right) \left(1 + \frac{(0,15 N D_u + 0,1 L_{TH}) f}{\pi N D_\delta} \sqrt{\frac{\rho \mu \mu_0}{\rho_\delta}}\right)}} \quad (9.33)$$

Моделирование мощности ВЧ нагрева для различных материалов в зависимости от напряжения на индукторе (рис.9.21,а) и частоты тока (рис.9.21,б) показало, что нагрев магнитных материалов требует меньшей мощности, а на более высоких частотах нагрев материалов происходит практически с одинаковой удельной мощностью.

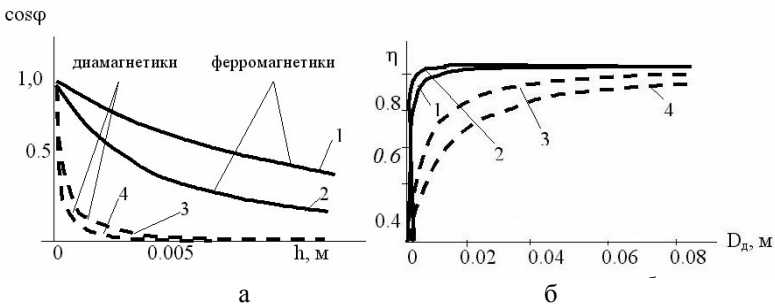


Рис. 9.20. Зависимости коэффициента мощности от величины зазора (а) и КПД ВЧ нагрева от диаметра детали (б) для материалов: 1 – ковар, 2 – сталь, 3 – олово, 4 – алюминий

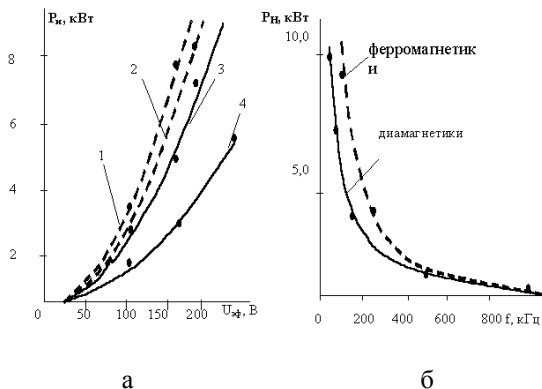


Рис. 9.21. Зависимости мощности ВЧ нагрева от напряжения на индукторе (а), частоты (б) и вида материалов: 1 – олово, 2 – алюминий, 3 – сталь, 4 – ковар

Общей закономерностью для всех материалов является нелинейное снижение коэффициента мощности нагрева в зависимости от частоты, что связано с проявлением поверхностного эффекта. ВЧ нагрев круговым индуктором диамагнитных материалов требует в 1,5 – 2,0 раза большей мощности ЭМ поля.

В качестве параметра оптимизации процесса СЧ нагрева выбрана его скорость, а исследуемыми параметрами являлись частота, амплитуда напряжения на выходе генератора и величина тока подмагничивания. Условия, матрица планирования и результаты моделирования методом полного факторного эксперимента приведены в табл. 9.2. Дисперсии коэффициентов в уравнении регрессии однородны, так как рассчитанное значение критерия Кохрена – 0,3352 меньше, чем его табличное – 0,3595. Модель процесса НЧ нагрева после полного факторного эксперимента имеет вид:

$$Y = 2365 + 1795\bar{X}_1 - 3,67\bar{X}_2 + 3,08\bar{X}_3 - 2,62\bar{X}_1\bar{X}_2 + 2,62\bar{X}_{1,3}. \quad (9.34)$$

Анализ модели показывает, что наибольшее влияние на скорость нагрева оказывает фактор X_1 (напряжение на выходе генератора), влияние факторов X_2 (частота тока) и X_3 (величина тока подмагничивания) менее существенно. В целях оптимизации модели процесса НЧ нагрева, при которых целевая функция достигает экстремума, использован метод крутого восхождения (Бокса-Уилсона).

Наибольшее значение скорости нагрева ($60 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$), подтвержденное экспериментальными данными, достигнуто при выходном напряжении $165 \pm 3 \text{ В}$, частоте тока $33 \pm 1 \text{ кГц}$, токе подмагничивания $3,5 \pm 0,5 \text{ А}$ [302].

Таблица 9.2.

Условия, матрица планирования и результаты эксперимента

Условия эксперимента				U, В- (x_1)	F, кГц- (x_2)	I _п , А- (x_3)				
Основной уровень,				150	30	5				
Интервал варьирования,				50	10	5				
Верхний уровень (+1)				200	40	10				
Нижний уровень (-1)				100	20	0				
№ опыта	x_1	x_2	x_3	Скорость нагрева $Y_i, \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$					$Y_{i,\text{cp}} \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$	$S^2(y)$
				1	2	3	4	5		
1	-	-	-	6,0	6,7	5,9	6,3	6,4	6,26	0,103
2	-	-	+	7,0	7,3	7,0	7,4	7,5	7,24	0,053
3	-	+	-	4,2	4,1	4,3	4,5	4,0	4,22	0,037
4	-	+	+	4,8	4,9	5,3	5,0	5,4	5,08	0,067
5	+	-	-	23,1	24,2	24,1	24,2	24,4	23,4	1,304
6	+	-	+	53,2	53,5	52,6	55,7	54,4	53,4	1,355
7	+	+	-	30,3	27,4	30,6	31,2	29,6	29,4	2,34
8	+	+	+	42,1	40,6	41,4	40,8	43,1	41,2	1,73

Для получения модели процесса в «почти стационарной области» использован центральный композиционный ортогональный план (ЦКОП), в результате обработки экспериментальных данных которого получено уравнение регрессии второго порядка, которое с учетом проверки коэффициентов полинома по критерию Стьюдента (при 5%-ном уровне значимости) имеет вид:

$$Y = 360 + 1,21X_1 - 1,01X_2 - 0,98X_3 - 1,83X_1 \cdot X_2 - 2,05X_1 \cdot X_3 + 1,12X_2 \cdot X_3 - 1,29X_1^2 - 0,93X_2^2 - 1,10X_3^2. \quad (9.35)$$

Графически уравнение поверхности отклика отображается в форме гиперболического параболоида. Для графической интерпретации результатов были построены сечения поверхностей отклика по скорости нагрева (рис 9.21–9.23), анализ которых позволяет сделать выводы, что увеличение тока подмагничивания ведет к росту скорости нагрева до оптимального значения, после чего магнитопровод входит в режим насыщения. Увеличение частоты при постоянном напряжении повышает скорость нагрева и снижает ее при увеличении тока подмагничивания, т.е. процесс нагрева имеет определенный оптимум параметров, при котором скорость максимальна. Для нахождения оптимальных значений параметров процесса решили систему уравнений второго порядка, для чего установили значение $X_1 = 0$ и приравняли нулю производные уравнения:

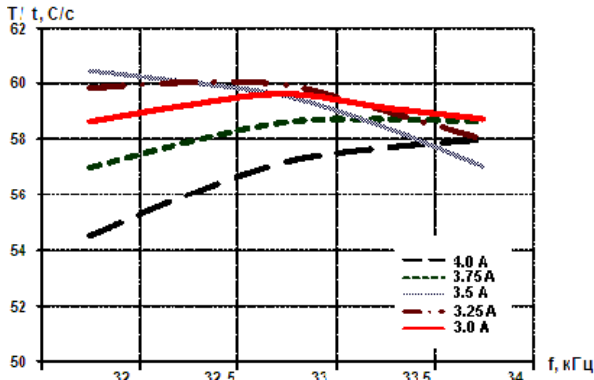
$$Y = 36,0 - 1,01 X_2 - 0,98 X_3 + 1,12 X_2 \cdot X_3 - 0,93 X_2^2 - 1,10 X_3^2 \quad (9.36)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial Y}{\partial X_2} = -1,01 - 1,12 X_3 - 1,85 X_2 = 0; \\ \frac{\partial Y}{\partial X_3} = -0,98 - 1,12 X_2 - 2,19 X_3 = 0. \end{cases} \quad (9.37)$$

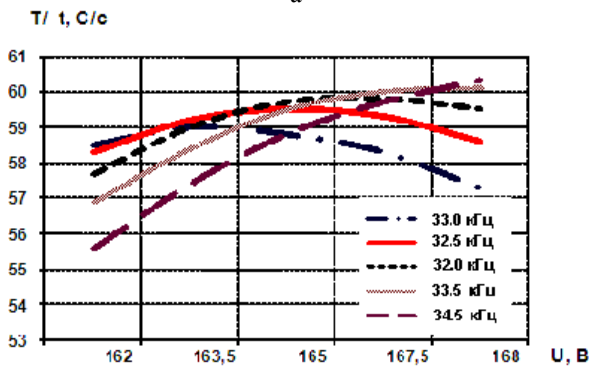
Решение системы уравнений дает значения параметров $X_2 = -0,5$, $X_3 = -0,6$. Оптимальные значения технологических параметров процесса при этом напряжение на выходе генератора – 167 В, частота – 32,5 кГц, амплитуда тока подмагничивания – 3,5 А, а область оптимума функции при данных значениях параметров соответствует 60,2 °С/с.

Результаты моделирования достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными. Максимальная скорость нагрева – 60 °С/с наблюдалась на частоте 32,5 кГц при величине тока подмагничивания 3,5 А и выходном напряжении 165 В. Дальнейшее повышение скорости нагрева в зазоре магнитопровода связано с повышением частоты нагрева до 66 и более кГц, применением магнитомягких ферритовых материалов с малыми потерями в качестве материала магнитопровода.

При ВЧ индукционном нагреве удельная мощность P_0 пропорциональна амплитуде магнитного поля в рабочей зоне H_m , удельному электрическому сопротивлению металла, магнитной проницаемости, и частоте:



а



б

Рис. 9.21. Зависимости скорости нагрева от частоты, величины тока подмагничивания (а) и выходного напряжения (б)

$$P_0 = Hm^2 \sqrt{(\rho \cdot \mu \cdot f)}, \quad (9.38)$$

Поскольку индуктор является нагрузкой, содержащей реактивную составляющую, при расчетах необходимо учесть коэффициент мощности $\cos \varphi$:

$$\cos \varphi = (X_{вн} + X_s) / (R_{ин}^2 + R_s^2)^{1/2}, \quad (9.39)$$

где $X_{вн}$ и X_s – вносимое реактивное сопротивление и реактивное сопротивление, определяемое магнитным потоком, $R_{ин}$ – сопротивление индуктора.

Тогда мощность нагрева определяется как [303]:

$$P = \frac{U_{эф}^2 \cdot \cos \varphi}{R_{дет} + R_{ин} + R_{лин}}, \quad (9.40)$$

где $U_{эф}$ - эффективное напряжение на индукторе, $R_{дет}$ и $R_{лин}$ - сопротивление детали и линии питания индуктора.

Оптимизация параметров индукционного нагрева в зависимости от частоты ВЧ генератора и материала детали выполнена с помощью MathCad показала линейное снижение мощности нагрева с ростом частоты, поскольку на более высокой частоте ярче выражен поверхностный эффект. С увеличением параметра $\rho\mu$ мощность нагрева монотонно снижается на участке $\rho\mu > 1$, поскольку растет электрическое сопротивление детали в зоне нагрева. Более резкое снижение мощности происходит на участке $1 > \rho\mu > 0$.

9.4. Оборудование и оснастка для высокочастотного нагрева

ВЧ индукционная пайка имеет преимущественное применение при малых размерах деталей во всех видах производства. Для этого применяются ВЧ генераторы с выходной мощностью до 25 кВт. Устройства состоят в основном из генератора, встроенного рабочего стола или машины пайки. Она устанавливается стационарно в любом месте производства. Однако, рекомендуется принимать во внимание срок службы генераторных ламп, и поэтому место установки генераторов не должно подвергаться вибрациям [94].

Обслуживание таких устройств исключительно простое, и, как правило, очень быстро усваивается обучающимся персоналом. Для серийного производства хорошо подходят машины пайки с круглым столом. Процесс пайки в них, за исключением загрузки и выгрузки, протекает полностью автоматически. Даже сложные конструкции можно разместить на четырех или восьми приемных устройствах. При малых паяемых деталях часовая производительность может достигать нескольких тысяч штук. Чисто машинный процесс и автоматическое задание всех времен (нагрева, пайки, охлаждения) обеспечивает неизменное качество пайки даже при большом числе деталей.

Большое внимание уделяется чистоте процесса ВЧ пайки. Неизбежные пары флюсов отсасываются благодаря вытяжной вентиляции и не оказывают вредного влияния на обслуживающий персонал. При правильном применении индукторных устройств процесс

полностью безопасен. Случайные касания индукционной катушки при токе ВЧ остаются без серьезных последствий для человека.

Оборудованием ВЧ нагрева являются различные по конструкции генераторы [304]. Внешний вид генератора ВЧИ–4–10, выпускаемого серийно в 70–х годах, приведен на рис. 9.24. Генератор с рабочей частотой 400 ± 11 кГц, максимальной выходной мощностью 10 кВт и расходом охлаждающей воды до $1,2 \text{ м}^3/\text{ч}$ изготавливался в виде металлического шкафа стационарного размещения, внутри которого размещались высоковольтный трансформатор, выпрямитель на полупроводниковых вентилях, ламповый автогенератор, аппаратура питания и управления [305].

Фирмы “Radyne Ltd” и “Delapena and Son Ltd” (Великобритания) в 70-х годах выпускали различные серии ламповых ВЧ–генераторов RD10, RD15, R40, RD100 и RD250 мощностью от 1 до 28 кВт, предназначенных для индукционного нагрева изделий в непрерывном и периодическом режимах [306]. Генераторы использовались в процессах закалки, пайки и отжига деталей и узлов, обезгаживания арматуры электронных ламп и в других операциях термообработки. Все генераторы были собраны в сварных алюминиевых корпусах, закрытых съемными крышками (или дверями) с блокировкой. Выпрямителями служили силовые кремниевые диоды типов ЕНТ-1750В RSTC, ЕНТ-1750В, S-12-M1, IS0.150.R08, IS0.50.S10. Предохранительные защитные устройства были выполнены в виде выключателя, имеющего три позиции: «выключено» - «испытание прибора» - «работа».

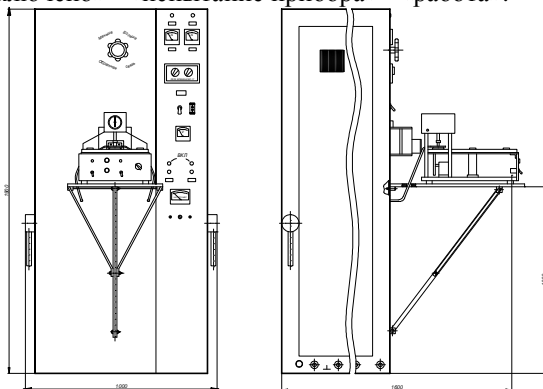


Рис. 9.24. Высокочастотный генератор ВЧИ-4-10

Выключатель, блокированный с цифровой запирающей системой, отключал высокое напряжение и обеспечивал безопасный доступ в генератор при открытых дверках. Защитные приспособления включены в первичную и вторичную цепи высоковольтного выпрямителя, что обеспечивает максимальную надежность работы.

Основные части ВЧ-генератора модели R40 (рис. 9.25): генерирующая, источник высокого напряжения, выходная, приборы контроля и управления размещены в одном шкафу. Защитная система включала реле расхода воды; свинцовые вставки в систему подачи воды, электрически соединенные с анодом лампы для защиты от электролиза; реле максимального тока; тепловую защиту от перегрева анода лампы. Для устранения перенапряжений при переходных процессах предусмотрено реостатное включение через схему задержки длительностью до 1 мин.

Выходная цепь генератора представляет собой жесткую модульную конструкцию. Регулируемый ВЧ-выходной трансформатор и конденсаторы колебательного контура заключены в отдельный легкосъемный узел, что позволяет получать выходную ВЧ мощность до 4 кВт при нагреве в диапазоне частот 450–550 кГц. Приборная панель обеспечивает удобное и свободное управление генератором. Расход охлаждающей воды при давлении 0,4 МПа составлял до 7 л/мин, а потребляемая мощность – до 10 кВт.

Фирма «Delapena and Son Ltd», кроме совместных работ с фирмой «Radyne Ltd», самостоятельно выпустила ламповые ВЧ-генераторы моделей: E.9, E.25, EV.150 и EV.200.

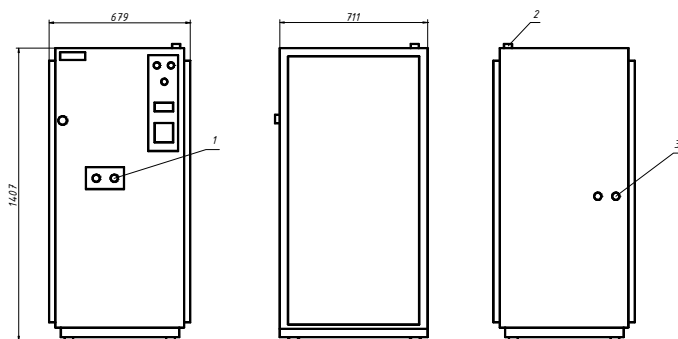


Рис. 9.25. ВЧ-генератор модели R40:

1 – ВЧ-выводы с наружной резьбой около 9 мм; 2 – труба диаметром 25 мм для подключения к сети; 3 – трубопровод для подачи воды

Модель Е.9 предназначена для пайки твердыми и мягкими припоями, термообработки различных деталей и избирательной закалки на частотах 375–400 кГц. Все узлы генератора размещены и смонтированы в сварном металлическом шкафу (рис. 9.26) на колесах, приборы контроля и управления выведены на переднюю панель, ВЧ-выход на верхнюю часть панели. Охлаждение лампы от водопроводной сети с расходом до 3,5 л/мин. Генератор оснащен устройствами защиты обслуживающего персонала и приборов на случай неправильного включения. Выходная ВЧ мощность до 9 кВт плавно регулируется, индукторы взаимозаменяемы.

Установка индукционной пайки [307], состоящая из ВЧ генератора с рабочей частотой 13,56 МГц, пульта управления и контроля, индуктора, педали включения цикла пайки, стола для сборки приборов перед пайкой, предназначена для герметизации малогабаритных приборов пайкой мягкими припоями в приборостроении. При мощности нагрева 1,2 кВт время пайки составляет 0,5–5,0 с. Установка имеет воздушное охлаждение генераторной лампы, плавную регулировку выходной мощности и времени нагрева. Внедрение установки и технологического процесса индукционной пайки приборов взамен ручной повысило культуру производства, чистоту внутреннего объема и качество приборов, увеличило производительность труда в 4,5 раза.

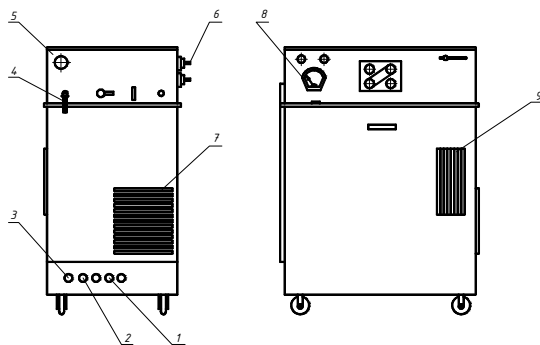


Рис. 9. 26. ВЧ-генератор модели Е.9:

1 – реле времени; 2 – ввод к дистанционному управляющему переключателю; 3 – сеть; 4 – ВЧ-выход; 5 – выход воздуха; 6 – рабочая катушка; 7 – охлаждение; 8 – амперметр-анод-сетка; 9 – впуск воздуха

Фирма MTA Automation (США) наладила выпуск ВЧ паяльных головок для автоматической пайки (рис.9.27,а). Нагревательный элемент содержит два индуктора, один выполнен из магнитного материала, другой – из диамагнитного, то есть с различными теплофизическими свойствами. Принцип работы основан на теплогенерации из-за скин-эффекта материалов с высокой магнитной проницаемостью, из-за возбуждения токами ВЧ.

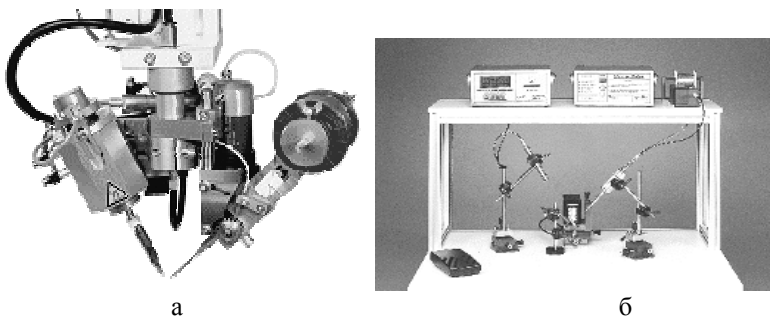


Рис. 9.27. ВЧ паяльник фирмы MTA (а) и паяльная станция фирмы F.W. Naug (б)

К достоинствам можно отнести: быстрый нагрев паяльника до рабочей температуры, автоматическую регулировку температуры в пределах $\pm 1^\circ \text{C}$ и подачу припоя в зону пайки.

Американская фирма F.W. Naug выпускает высокочастотные паяльные станции (рис. 9.27,б), которые содержат: ВЧ генератор РС32-01, нагревающуюся головку, регулируемую опору, устройство управления, инфракрасный температурный датчик, источник припоя, систему распределения газа, чтобы избежать окисления, а также для охлаждения обрабатываемой детали.

Для ручной индукционной пайки компанией American Nakko разработан паяльник с регулируемым ВЧ нагревом [308], который содержит металлическую трубчатую рукоятку из магнитонепроницаемого материала, на переднем конце которой концентрично закреплен короткий трубчатый держатель наконечника с намотанной на нем индукционной катушкой. На переднем конце держателя закреплен съемный конический медный наконечник, наружная поверхность которого покрыта железом, само жало – слоем $\text{Cr} - \text{Sn}$. В наконечник введен датчик температуры, выходной сигнал

которого подается в систему регулирования температуры. Рабочая температура паяльника находится в пределах 200–400⁰С.

Паяльный инструмент марки METCAL, выпускаемый американской фирмой OK International (OKI) [309], завоевал огромную популярность среди производителей электроники, в первую очередь благодаря индукционному паяльнику, запатентованному компанией 15 лет назад. Применение индукционного метода в паяльных системах стало своего рода технической революцией в технологии ручной пайки. С переходом на бессвинцовую технологию в Европе и США интерес к ним только усиливается, поскольку индукционный метод нагрева идеально подходит как для традиционной, так и для бессвинцовой пайки.

Компания OK International выпустила новейшую систему APR5000 для точной установки и пайки BGA-компонентов, которая является одной из лучшей в своем классе, и не случайно такие фирмы, как Motorola и Nokia рекомендовали своим сервисным центрам, разбросанным по всему миру, оснаститься этой системой.

В основе метода лежит нагрев наконечника паяльника переменным магнитным полем. Собственно наконечник изготовлен из меди с ферромагнитным покрытием в его хвостовой части, которая в тоже время является сердечником катушки, создающей постоянно действующее переменное магнитное поле (рис.9.28). Наконечник нагревается за счет наведенных поверхностных токов. При температуре точки Кюри, ферромагнетик теряет свои магнитные свойства, нагрев прекращается, и температура стабилизируется.



Рис. 9.28. Схема индукционного паяльника

В момент касания платы температура наконечника падает, магнитные свойства материала мгновенно восстанавливаются, и наконечник вновь начинает поглощать энергию из магнитного поля, стремясь удержать температуру в точке Кюри. Чем более теплоемкий контакт приходится паять, тем больше отклонится температура, и тем больше энергии будет поглощено из поля. Таким образом, система «подбирает» требуемую мощность для нагрева каждого контакта в зависимости от его теплоемкости.

Главное преимущество индукционного паяльника перед классическим – это большая теплоотдача. Миниатюрный инструмент с индукционным нагревателем мощностью 35 Вт на многослойной плате работает так, как некоторые классические паяльники вдвое большей мощности. Это означает, что все работы могут выполняться при более низкой температуре наконечника без риска получить «холодную пайку». Кроме того, один и тот же паяльник может быть использован как для тончайших операций с микро компонентами, так и для силовой пайки на многослойных платах. При этом инструмент остается очень легким и эргономичным (рис.9.29).



Рис. 9.29. Работа с индукционным паяльником

Столь уникальные свойства объясняются тем, что в индукционном паяльнике нагревается непосредственно сам наконечник, в то время как у классических инструментов первично нагревается проводник в нагревательном элементе, а наконечник получает тепло уже вторично. При этом, на пути от нагревателя к наконечнику существует ряд препятствий, начиная от керамики, теплопроводность которой весьма ограничена, кончая воздушным зазором, что недопустимо

Для СЧ нагрева небольших деталей из проводящих материалов применяют индуктирующий элемент с зазором магнитопровода. Индуктор (рис. 9.30,а) содержит магнитопровод с индуктирующей обмоткой, которая одновременно подключается к источнику переменного тока низкой частоты и генератору. Нагрев изделия и припоя в зазоре магнитопровода осуществляется подачей электрических колебаний частотой 40–100 кГц от генератора в обмотку на магнитопроводе, а вибрации – подачей переменного тока подмагничивания частотой 50–400 Гц и амплитудой 1–10 А в индуктирующую обмотку (рис.9.30, б). Для герметизации пайкой

корпусов ИМС с планарными выводами типа "Схема-69", изготовленных из сплава 29Н19К и имеющих гальваническое покрытие сплавом никель-индий толщиной 6 мкм, применен припой ПОС-61 в присутствии спирто-канифольного флюса.

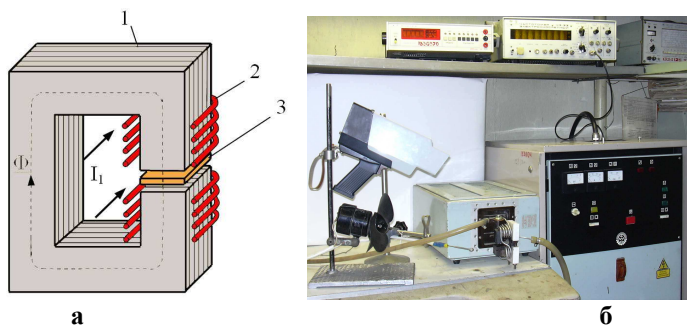


Рис. 9.30. Индуктор на магнитном сердечнике (а) и рабочее место пайки (б)

Нагрев изделия осуществлялся в зазоре магнитопровода из феррита марки 1000НМ сечением 210 мм^2 на частоте 66 кГц при напряжении на индуктирующей обмотке 300 В. Через 3 с после включения нагрева припойная прокладка расплавлялась и с этого момента времени в индуктирующую обмотку подавался ток подмагничивания частотой 50 Гц и амплитудой 5 А в течение 1–2 с. Вследствие вибрации крышки припой заполнял зазор в соединении и образовывал равномерные галтели по периметру паяного шва [296].

В НИИ "Волна" г. Саратов разработана установка для герметизации корпусов микроблоков пайкой с совместным активирующим действием энергии УЗ и ЭМ колебаний, работающая в полуавтоматическом режиме (рис.9.31). Корпуса размерами до $220 \times 120 \times 80 \text{ мм}$ нагревались по периферии ВЧ нагревом с частотой $440 \pm 10 \text{ кГц}$ до температуры $220\text{--}240^\circ\text{C}$, после чего на корпус подавались УЗ колебания частотой $22 \pm 1 \text{ кГц}$ для бесфлюсовой пайки. Производительность установки составляла до 50 шт/час, потребляемая мощность – 10 кВт.

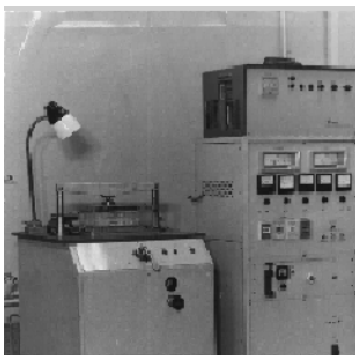


Рис.9.31. Внешний вид оборудования для герметизации микроблоков

9.5. Технология ВЧ конструкционной и монтажной пайки

ВЧ конструкционная пайка широко применяется в инструментальном производстве, крупносерийном производстве конденсаторов, релейной аппаратуры, трубчатых электронагревателей, коммутационных устройств и волноводных трактов [310]. Области применения ВЧ конструкционной и монтажной пайки, а также ВЧ плавки металлов приведены на рис. 9.32.

Коммутационные устройства: контакторы, автоматические выключатели и т.д. – как низковольтные, так и высоковольтные содержат контакты из металлов и сплавов с особыми свойствами на базе серебра, меди, никеля, вольфрама и других элементов. Контакты изготавливают в виде пластин, которые крепят, как правило, с помощью пайки к контактодержателю, образуя с ним контактный узел. Применяют обычно медные контактодержатели, изготовленные листовой штамповкой, литьем либо порошковой металлургии.

Пайка контактных узлов производится в основном твердыми серебросодержащими припоями с применением ВЧ нагрева [311]. Большая номенклатура и сложность конфигурации контактодержателей затрудняет проектирование нагревательных систем, выбор частоты и мощности источников питания и разработку индукторов. Исходя требований унификации (на одном посту необходимо паять детали толщиной приблизительно от 0,5 до 5 мм) выбирают ламповые генераторы с рабочей частотой 66 кГц или 440 кГц.



Рис. 9.32. Применение ВЧ нагрева для конструкционной и монтажной пайки

Пайка производится на механизированном станке. На круглом металлическом столе неподвижно смонтированы приспособления для крепления хвостовых частей контактодержателей. Столу сообщается дискретное вращение, т.е. быстрый поворот на один шаг – угол между соседними приспособлениями – и выдержка в каждом положении. Производительность станка до 900 паяк в час. Операции загрузки порошкообразной смеси припоя с флюсом, а также контактных пластин механизированы. В зону нагрева, охватывающую три – шесть позиций, паяемые узлы поступают в собранном состоянии.

Для разработанной конструкции станка применялись два проходных индуктора. Нагрев узлов, у которых зона пайки контактодержателя не экранируется другими участками производится в индукторах с односторонним расположением индуктирующих токопроводов. В них нагревались контактодержатели нескольких типоразмеров различной

конфигурации. При частоте 66 кГц достигался достаточно равномерный нагрев поверхностей, подлежащих пайке до 700 – 800 °С за 10 – 16 с независимо от толщины контактодержателя.

Для предотвращения чрезмерного нагрева металлического стола (его температура не превышала 30°С) применен водоохлаждаемый медный экран. Конфигурации некоторых контактодержателей, подлежащих пайке, не удается нагреть в индукторах с односторонним расположением индуктирующих токопроводов. Для нагрева таких узлов разработаны проходные индукторы с двусторонним расположением индуктирующих токопроводов (рис. 9.33). В них зона пайки нагревается в основном за счёт теплопроводности, в связи, с чем возникает опасность перегрева участка контактодержателя вплоть до расплавления. Поэтому приходится увеличивать время нагрева, но при этом либо снижается производительность, либо следует увеличивать длину индуктора, чтобы нагреть в нем одновременно больше деталей. Это ведет к росту потребляемой мощности из-за повышенных энергетических потерь и эксплуатации генератора в неоптимальном режиме.

Важное условие механизированной ВЧ пайки – обеспечение стабильного качества паяных узлов, которое получалось при дозировании энергии по времени нагрева при стабилизированных режимах работы генератора. Однако при пайке некоторых типоразмеров контактных узлов получается брак от 10 до 50% в основном из-за непропаев или вытекания припоя, что является следствием непостоянства температуры заготовок: недогрев в первом и перегрев во втором случаях.

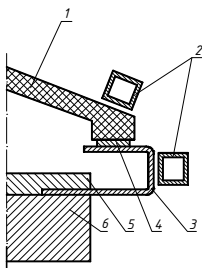


Рис. 9.33. Схема нагрева проходным индуктором с двусторонним расположением токопроводов: 1 – прижим, 2 – прямой и обратный токопроводы,; 3 – контактодержатель, 4 – контактная пластина, 5 – зажимное приспособление, 6 – поворотный стол

При дозировании энергии по времени причинами разброса температуры нагрева могут быть: недостаточная стабилизация режимов

лампового генератора (генераторы типа ВЧИ-100/0,066 имеют стабилизацию анодного напряжения 1% при колебаниях в сети до 10%, однако напряжение питающей сети может отличаться от номинального на 15 – 20%, и этот фактор является трудно устранимым); нестабильное положение паяемых деталей относительно индуктора, определяемое разбросом формы и размеров (массой деталей, точностью механизмов и зажимных приспособлений, величиной люфтов; при этом разброс температуры может быть уменьшен путем увеличения времени нагрева); непостоянство физических свойств (электропроводность, теплоемкость и др.) паяемых деталей – очень существенный фактор.

Для того, чтобы при механизированной индукционной пайке труб различных размеров со сферическими втулками, кольцами и специальными соединительными частями не пользоваться для каждого размера отдельным индуктором, был разработан газоохлаждаемый индуктор с взаимозаменяющимися частями [312]. Такой индуктор для ВЧ пайки в газовой среде, в сравнении с обычным кольцевидным индуктором, более универсален, т.к. все составные части изготовлены, собраны и спаяны из меди. К этому добавляется ещё и необходимое охлаждение водой и защитный газ.

Конструкция базового индуктора предусмотрена с различными вставками для различных труб. Сборка достигается при помощи латунных шурупов (рис. 9.34). Внутренний диаметр базисного индуктора 4 соответствует самым большим трубам 1. При этом измерения вставок 5, 6 и паяемых деталей должны сочетаться. Щель между индукторной вставкой и паяемыми деталями соответствует 2,5 мм. Чтобы достигнуть наиболее равного заполнения паяемой поверхности защитным газом, устанавливается подача газа 8. Для изменения направления защитного газа в верхних вставках устанавливается выступ 7. Расход защитного газа составляет от 200 до 300 л/час. В качестве защитного газа применяется редуцированный газ, H_2/N_2 – смешанный, или формирующий газ с отношением в смеси 1:5.

Включение ВЧ энергии происходит одновременно с подачей защитного газа. Чтобы противодействовать образованию воды из водорода защитного газа от основы карбоната меди под действием влажности при конденсации, необходимо работать с дросселируемым охлаждением, так чтобы индикатор показывал температуру 25 – 35 °С.

Для паяльных работ применялся генератор типа GI 15/06 T-035 с бесступенчатой регулировкой мощности от 0 до 15 kW через тиристорный регулятор переменного тока частотой от 420 до 660 кГц. Рабочий стол служит для крепления зажимного устройства заготовок.

При глубине вставки трубки в соответствующий соединительный патрубок от 6 до 8 мм применялся припой с диаметром проволоки от 1 мм при паяльной щели 0,1 мм. Количество защитного газа регулировалось при пайке так, чтобы образующееся слабое газовое пламя выше и ниже индуктора закрывало заготовку на несколько миллиметров. Время пайки 15–25 с составляло при использовании мощности генератора на 35% для различных диаметров трубок. После пайки защитным газом на заготовках остается только легкий слой оксида и окалины, который без труда удаляется.

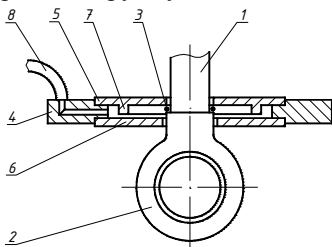


Рис. 9.34. Газоохлаждаемый индуктор: 1 – гидравлическая трубка, 2 – кольцо, 3 – кольцо припоя, 4 – основной индуктор, 5 – верхняя насадка, 6 – нижняя насадка, 7 – выступ, 8 – подвод защитного газа

При ВЧ нагреве нескольких заготовок с большими расстояниями друг от друга в индукторе, имеющем форму канала, возникает неравномерность нагрева участков заготовок, удаленных от индуктора. Для обеспечения равномерности нагрева заготовки необходимо вращать, что не всегда осуществимо. Для устранения неравномерности нагрева предложено заполнить рабочее пространство индуктора немагнитными вставками с низким электрическим сопротивлением, например, из меди (рис.9.35). Токи, наводящиеся во вставках, имеют обратное направление, чем в индукторе и вызывают соответствующие токи в заготовках, что повышает эффективность индуктора [313].

Ручная пайка штыревых контактов разъемов к печатным платам всегда отличалась большой трудоемкостью, недостаточной повторяемостью соединений и большой вероятностью повреждения печатных проводников нагретым паяльником. Индукционный нагрев контактов из магнитного материала–никеля позволил реализовать групповую пайку с высокой производительностью. При размещении 24-х контактов в электромагнитном поле индукционного витка, питаемого от генератора с частотой 450 кГц и мощностью 5 кВт,

каждый контакт испытывает индивидуальный нагрев, вызывающий расплавление припоя на контактных площадках печатной платы.

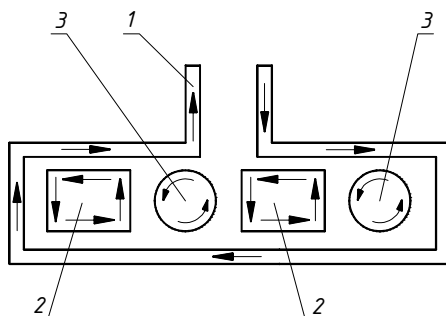


Рис. 9.35. Размещение заготовок и вставок в индукторе:
1 – индуктор; 2 – заготовка; 3 – вставка

Это позволяет получать хорошее качество соединений с контролируемой дозой припоя. Этот метод также удобен и для распайки разъемов и удаления их с платы [314].

В настоящее время предприятия электронной промышленности для производства своих изделий расходуют большое количество золота, которое благодаря своим уникальным свойствам нашло широкое применение в производстве полупроводниковых приборов и интегральных микросхем (ИМС) в виде чистого металла или сплава. Темпы развития электронной промышленности приводят к значительному росту потребления золота, поэтому особую актуальность приобретают работы по утилизации технологических отходов с выделением содержащихся в них драгоценных металлов для повторного использования. Золото, выделяемое из технологических отходов химическим и электрохимическим методом в виде порошка затем сплавляется в слитки.

При плавке важно не допускать его загрязнения металла при контакте с нагревателем или атмосферой, нагрев вести с высокой скоростью. Это необходимо для экономии энергетических ресурсов и обеспечение высокой производительности. Наибольшей скоростью и высоким значением удельной мощности нагрева обладает ВЧ нагрев, который позволяет с помощью индукторов локализовать тепловыделение, применить защитную атмосферу и автоматизировать процесс нагрева. Установка высокочастотной плавки металлов в вакууме (рис. 9.36) включает источник ВЧ энергии – генератор на лампе ГУ-56, выполненный по одноконтурной схеме с индуктивно-емкостной

обратной связью. Генераторная лампа нагружена на колебательный контур, состоящий из водоохлаждаемого рабочего индуктора и согласующего устройства СУ, который соединен с генератором ВЧ экранированным кабелем [315].

Индуктор 1 представляет собой соленоид, свитый из 8 витков полой медной трубки диаметров 6 мм и имеющей гальваническое серебряное покрытие толщиной 20 мкм. Внутри индуктора располагалась кварцевая труба 2, с обеих сторон герметично закрытая заглушками 3, в кварцевую трубу помещалась лодочка с нагреваемым материалом 4. В отверстие в одной из заглушек вставлен штуцер, через который с помощью механического НВПР-16-066 и диффузионного АВР-60-Р вакуумного насосов 5 в кварцевой трубе создается вакуум. В процессе нагрева контролировались: частота тока – электронным частотомером ЧЗ-67, температура изделий – термопарой типа ХА, соединенной с потенциометром самопишущим КСП-4, степень разряднения в камере нагрева – вакуумметром ионизационно–термопарным ВИТ-1.

ВЧ плавка велась при максимальной напряженности магнитного поля в рабочей зоне индуктора, что обеспечивалось соответствующим выбором напряжения на индукторе, согласованием индуктора с выходным каскадом генератора с помощью конденсаторного блока. В качестве материала использовался медный порошок. Для уменьшения окисления слитков в камере нагрева создавался вакуум порядка 0,1 Па и в непосредственной близости с зоной нагрева располагался титановый гетер. Металлический порошок загружался в кварцевую лодочку, для ускорения нагрева в ее центре помещалась затравка из того же металла. Лодочка помещалась в камеру нагрева в центре индуктора. Рядом с лодочкой находились титановые диски, используемые в качестве гетера. Металлическая затравка, вследствие большей площади поверхности, нагревалась быстрее и расплавлялась. Частицы расплавленного металла двигались под действием ЭМ поля втягивали в расплав нагретые частицы металлического порошка. Весь процесс плавки протекает с высокой скоростью и занимает не более 1 мин.

Анализ экспериментальных данных показал, что скорость нагрева различных металлов линейно зависит от напряжения на индукторе. При увеличении мощности до 1,0 кВт скорость нагрева материалов с большим удельным сопротивлением и магнитной проницаемостью увеличивается быстрее, чем для материалов с меньшим удельным сопротивлением и магнитной проницаемостью.

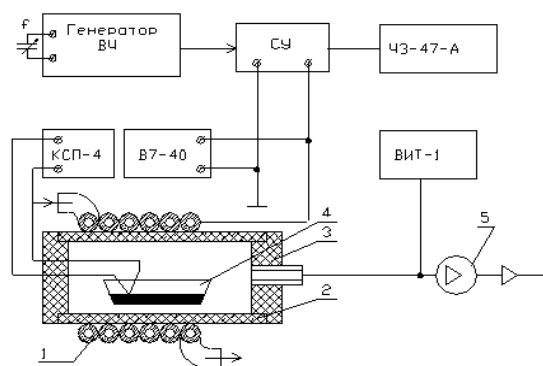


Рис. 9.35. Схема ВЧ плавки металлов в вакууме

Воздействие энергии ЭМ поля позволяет осуществить высокопроизводительный бесконтактный нагрев материалов с помощью наведенных в них вихревых токов ВЧ, а также активировать припой и улучшить его растекание по паяемым поверхностям. Качество контактных соединений при ВЧ пайке зависит от следующих факторов нагрева: скорости, избирательности и локальности, равномерности, регулируемости во времени и по сечению материалов.

Анализ зависимостей времени нагрева ВЧ от расстояния между индуктором и металlostеклянным корпусом БИС для трех вариантов размещения индукторов относительно корпуса (рис. 9.36,а), полученных при следующих режимах работы ВЧ генератора: $I=1,2$ А, $I_c=0,8$ А и колебательной мощности 7,2 кВт, показал, что нагрев 2-х витковым индуктором (варианты 2 и 3) более производителен, то есть при одном и том же расстоянии требуется в 4–5 раз меньшее время нагрева, чем с одновитковым индуктором (вариант 1) [316]. Для каждого из вариантов нагрева имеется оптимальное расстояние , при котором нагрев подложки БИС минимален (рис. 9.36,б): по варианту 1 нагрев не превышает 85°C, по варианту 2 и 3 – 70 и 65°C соответственно. Меньший нагрев подложки по варианту 3 объясняется изменением распределения силовых линий ЭМ поля в процессе нагрева, что снижает непроизводительный нагрев защитного экрана и способствует формированию качественного паяного соединения за счет равномерного прогрева крышки и корпуса БИС. Нагрев подложки БИС уменьшен до 5–55°C за счет улучшения контакта между корпусом и теплоотводом.

Зависимости температуры в зоне пайки от времени при оптимальном расстоянии показали (рис. 9.37,а), что ВЧ нагрев в случае 2-х виткового индуктора (варианты 2 и 3) более эффективен, так как время нагрева не превышало 3 с, в результате чего БИС не успевает нагреться. Полученные зависимости сохранялись в диапазоне частот работы генератора ВЧИ-4-10 от 440 до 650 кГц [317].

Для повышения эффективности ВЧ нагрева и уменьшения теплового воздействия на герметизируемые ИЭ на наружную поверхность крышки наносили покрытие из материала с низким электрическим сопротивлением, образующее короткозамкнутый виток вдоль паяемого соединения [290]. В качестве материала покрытия была выбрана медь, его толщина составляла 20 мкм. При подаче ВЧ напряжения на индуктор происходил быстрый локальный нагрев сопрягаемых поверхностей крышки и корпуса до температуры пайки за счет преимущественного нагрева наружного покрытия, образующего короткозамкнутый виток с малым электрическим сопротивлением. Время нагрева при анодном токе генераторной лампы 1,0–1,5 А снижено на 30%, нагрев подложки БИС уменьшился на 30–40% [318].

Испытания на герметичность корпусов БИС показали, что уровень натекания гелия находился в требуемых пределах и не превышал $1 \cdot 10^{-5}$ л·мкм/с. Металлографические исследования соединений свидетельствовали о хорошей смачиваемости припоем соединяемых поверхностей, слой припоя монолитен, газовые раковины и шлаковые включения отсутствовали. Испытания на работоспособность герметизируемых БИС показали, что отклонений в параметрах схем не наблюдалось.

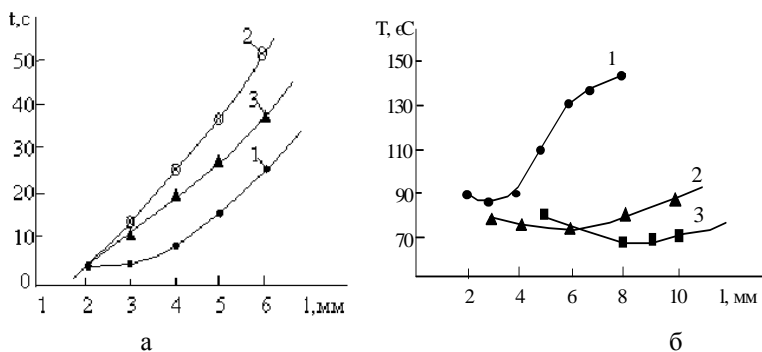


Рис. 9.36. Зависимости времени нагрева (а) и температуры подложки (б) от расстояния индуктор – крышка и вида индуктора

Исследования зависимости температуры пайки корпуса микросборки от времени, при расстоянии от индуктора до крышки 3 мм и выходной мощности генератора 7,2 кВт, показали (рис.9.37,б), что одновитковый индуктор (1) ввиду крутого участка кривой нагрева создает жесткие условия ВЧ нагрева, характеризующиеся временем пайки менее 3 с и перегревом припоя. Двух витковый индуктор катушечного типа (2) в силу эффекта взаимодействия одинаково направленных магнитных полей, создаваемых индуктирующими проводниками, характеризуется низкой эффективностью, заключающейся в длительном времени пайки (до 12 с) [319]. Применение 2-х виткового индуктора в одной плоскости (3) вследствие более полого участка кривой нагрева, чем у индуктора (1), создавало более равномерный нагрев корпуса и крышки, соединяемых пайкой. Это способствует более полному заполнению припоем зазора между соединяемыми деталями при сравнительно небольшом времени пайки – не свыше 8 с.

Применение магнитопровода из феррита в сочетании с индуктором (3) повысило эффективность нагрева в 1,6 – 1,7 раза (4), сокращая тем самым время пайки. Температура подложки в случае индуктора (1) не превысила 50°C , индукторов (3) и (4) – 80°C , индуктора (2) – 100°C . Теплоотводящий элемент, контактирующий с основанием корпуса микросборки, дополнительно снизил температуру нагрева подложки на 20 – 25% [320].

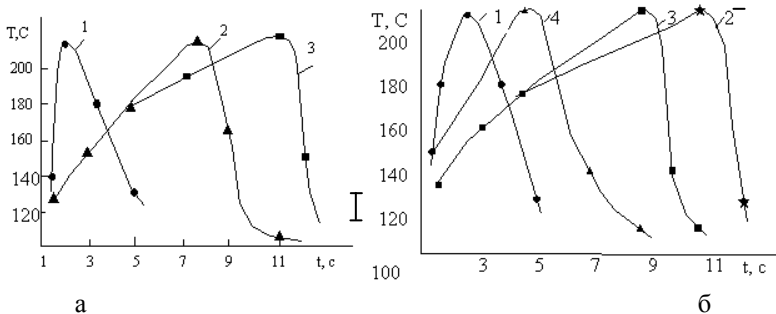


Рис. 9.37. Временные зависимости температуры в зоне пайки корпуса БИС (а) и микросборки (б) от типа индуктора

Измерение Э.Д.С. наведенной внутри корпуса при использовании одновиткового индуктора, показало (рис. 9.38), что в случае (1) крышки из стали 10 величина наводки на частоте 440 кГц примерно в 2 раза ниже, чем для крышки из сплава Д16Т (2). Применение медного экрана толщиной 5 мм (4), располагаемого в процессе нагрева на внешней

поверхности крышки, обращенной к индуктору, уменьшило величину электрической наводки более чем в 4 раза, чем без экрана (3). Измеренные величины электрической наводки подтверждают необходимость выполнения условия, что толщина стенки корпуса должна быть не менее чем в 4 раза больше глубины проникновения токов ВЧ в материал корпуса. При этом величина напряженности оказывается на несколько порядков меньше значений, приводящих к выходу из строя полупроводниковых приборов [321].

Для проверки работоспособности полупроводниковых приборов осуществлялась распайка бескорпусных транзисторов типа 2Т360Б на контактные площадки подложки и последующая их герметизация в корпусе микросборки при оптимальных параметрах ВЧ нагрева. После разгерметизации корпуса измерялись такие параметры транзисторов, как коэффициент усиления и обратный ток коллектора. Измерения на партии транзисторов (50 шт.) показали, что изменение коэффициента усиления в среднем на 1 – 2 единицы вполне соответствует значениям параметров транзисторов после термотренировки. Изменения в величине обратного тока коллектора, отказы приборов или резкие отклонения в значениях параметров не наблюдались.

Таким образом, применение ВЧ нагрева при герметизации пайкой корпусов микросборок, изготовленных из диамагнитных сплавов, позволяет увеличить в 5 – 8 раз производительность процесса, повысить надежность микроэлектронных приборов, а также применить припой ПОС61 взамен дефицитных оловянно-кадмиевых и оловянно-висмутовых припоев [322].

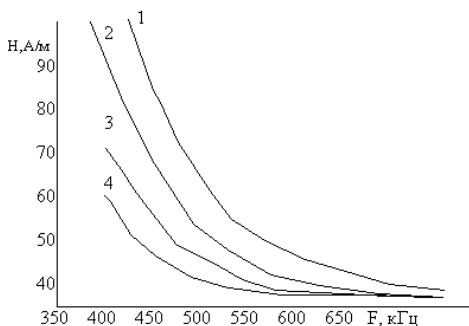


Рис. 9.38. Зависимость напряженности ЭМ поля внутри корпуса микросборки от частоты тока

Исследования процесса ВЧ нагрева ИМС в металlostеклянных корпусах, изготовленных из сплава 29Н18К [323], показали линейную зависимость напряженности магнитного поля H_m от напряжения на индукторе на частоте 2,5 МГц без магнитопровода из феррита 1 и в случае его применения 2 (рис. 9.39, а). Значение напряженности магнитного поля во втором случае в среднем в 2-2,5 раза были выше за счет уменьшения рассеяния магнитного поля. Оценка скорости нагрева в зависимости от напряжения на индукторе показала (рис. 9.39, б), что при обычном нагреве она не более 100°С/с, а с магнитопроводом - до 200°С/с и более, что связано с квадратичной зависимостью удельной мощности нагрева от напряженности поля в сильных ЭМ полях. Скорость нагрева зависит также от проводимости материалов и коэффициента перекрытия зазора (рис.9.40) [324].

Оптимальным является расположение изделий таким образом, чтобы через площадь нагретой зоны максимально проходили силовые линии магнитного поля индуктора. При нагреве мощностью 1 кВт время нагрева при герметизации пайкой корпусов ИМС не превышало 1,5 с, что в 4 раза меньше, чем при косвенном контактом нагреве. Нагрев ИЭ необходимо вести при наибольшей напряженности магнитного поля в рабочей зоне индуктора, что обеспечивается выбором напряжения на индукторе, применением ферритовых магнитопроводов, концентрирующих магнитный поток.

Для возбуждения пондеромоторной силы в расплаве припоя исходная доза припоя располагалась в центре контактной площадки и в зоне действия ЭМ поля, а замыкающий участок контура – за пределами (рис. 9.41).

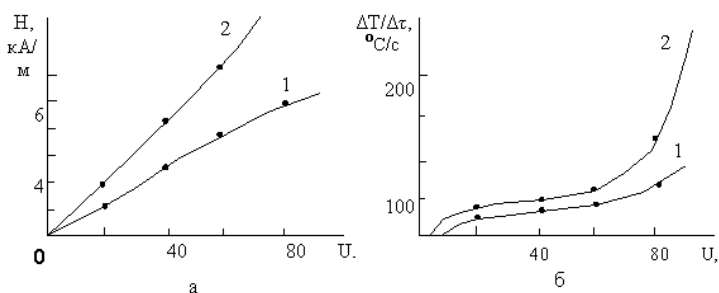


Рис. 9.39. Зависимости напряженности магнитного поля (а) и скорости нагрева (б) от напряжения на индукторе: без магнитопровода 1 и с ним 2

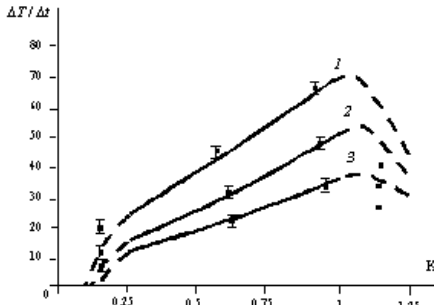


Рис. 9. 40. Зависимости скорости нагрева от коэффициента перекрытия зазора: 1 – медь, 2 – алюминий, 3– сталь

Под действием вихревого тока и индукции магнитного поля скорость нагрева с замкнутым контуром увеличилась на 15– 20 %, а коэффициент растекания припоя в 1,5–1,8 раза. При пайке рамки корпуса микросборки из титанового сплава ВТ-5 к керамической плате с толстопленочной металлизацией ВЧ колебания модулировались частотой 250 Гц и амплитудой 150 В от генератора НЧ в течение 5 с при глубине модуляции 60%.

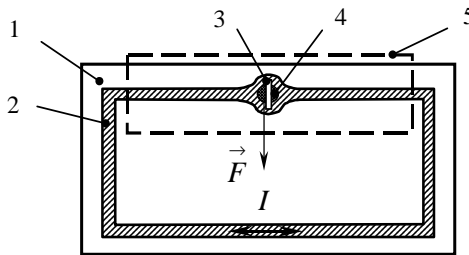


Рис. 9.41. Схема действия пондеромоторной силы на припой: 1 – плата, 2 – печатный проводник, 3 – прорезь, 4 - контактная площадка с припоем, 5 – проекция индуктора

Сокращение времени нагрева и повышение качества соединений достигнуто при глубине модуляции ВЧ колебаний на уровне 60%. Температурные зависимости для различных вариантов размещения индуктора относительно корпуса БИС приведены на рис. 9.42.

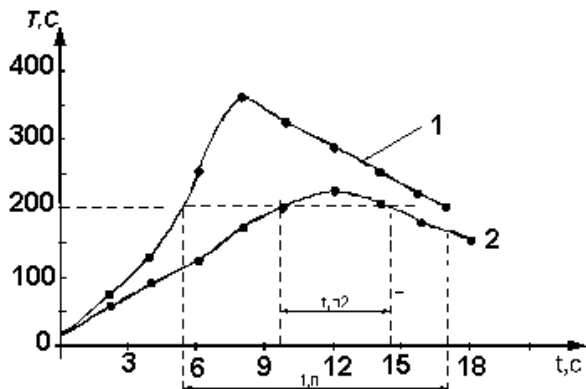


Рис 9.42. Температурные зависимости при ВЧ пайке:
1- верхнее, 2- нижнее расположение индуктора

В ВЧ паяльнике фирмы MTA.Automation.Ag нагревательный элемент состоит из двух слоев сплава, один – магнитный, другой – не магнитный с различными тепловыми свойствами. Генерация тепла обусловлена поверхностным эффектом в материалах с высокой магнитной проницаемостью (рис. 9.43).



Рис. 9.43. Высокочастотный паяльник

По мере того как температура увеличивается, магнитная проницаемость уменьшается, пока не станет равной нулю при температуре точки Кюри. Вблизи этой температуры величина тока ограничивается слоем немагнитного сплава с низким сопротивлением, и в центре нагревательного элемента температура очень быстро падает. Падение температуры, обусловленное пайкой, заставляет ток перемещаться на внешний слой, который опять нагревается. Тепловая инерция системы очень низкая и регулирование тепла быстрое и точное на уровне ± 1 С.

Для оптимальной работы любой системы ВЧ индукционного нагрева необходим расчет температурного режима с учетом сложности конфигурации детали [325], а также согласование параметров индуктора с источником питания, что представляет в ряде случаев сложную задачу. Измерение параметров индукторов на малых токах может привести к значительным погрешностям. Для определения параметров индуктора на режимах, близких к номинальным, разработана установка на тиристорах, коммутируемых системой управления [326]. Кривая тока в диапазоне 110–170 А фиксируется осциллографом с памятью, производящим цифровую обработку сигнала. По периоду колебаний, декременту затухания и емкости согласующих конденсаторов, рассчитывают индуктивность и сопротивление индуктора. В конечном итоге определяются КПД и коэффициент мощности системы нагрева.

Преимущества ВЧ паяльников заключаются в следующем:

- очень быстрое повышение температуры с высокой точностью;
- рабочая температура на 50°С ниже, чем при нагреве паяльником;
- при одинаковом потреблении энергии, ВЧ паяльник излучает в 2 раза меньше тепловой энергии, чем обычный.

Глава 10. ИНФРАКРАСНАЯ И ЛАЗЕРНАЯ ПАЙКА СОЕДИНЕНИЙ

10.1. Особенности нагрева инфракрасным излучением

Инфракрасное излучение в общем случае имеет длину волны в диапазоне 0,72–1000 мкм. Однако для пайки используется только малый отрезок этого диапазона и, в частности, можно выделить следующие поддиапазоны: 0,72–1,5 мкм, так называемое близкое ИК излучение; 1,5–5,6 мкм – среднее ИК излучение и 5,6–10,0 мкм – дальнее ИК излучение [266]. Длина волны ИК излучения зависит от температуры источника излучения (при высоких температурах нагрева излучение имеет меньшую длину волны). Температура нагрева тела будет в общем случае зависеть от длины волны излучения, степени черноты или его отражающей способности, длительности облучения и, конечно, от массы тела. Чем короче длина волны излучения, тем глубже оно проникает в тело, поэтому близкое ИК излучение обеспечивает более глубокое его проникновение по сравнению со средним и дальним [267].

Лучистый ИК нагрев с 70-х годов широко применяется в производстве изделий микроэлектроники в большинстве технологических процессов, связанных с термической обработкой: диффузии, термическом окислении, эпитаксиальном наращивании, осаждении слоев из газовой фазы, отжиге, сушке, герметизации корпусов изделий пайкой и др. [328–331].

Различные материалы по-разному адсорбируют ИК энергию. В общем случае различают четыре условия передачи ИК энергии телу: отражение, непрозрачность, прозрачность и полупрозрачность. В первом случае вся ИК энергия отражается от поверхности тела, которое не нагревается. Во втором случае ИК энергия тормозится на его поверхности, которая в основном и нагревается. В прозрачном материале ИК энергия проходит через него, не вызывая нагрева, в полупрозрачном – энергия проникает на определенную глубину, вызывая на этой глубине нагрев тела. Исходя из особенностей ИК излучения, возникли проблемы в практическом применении его для пайки изделий электроники:

- неравномерность нагрева различных компонентов и зон на поверхности платы из-за разной степени черноты материалов и массы компонентов;

- плохая воспроизводимость режимов нагрева вследствие рассогласования спектра излучения источника и спектров поглощения

компонентов и платы;

- необходимость подбора режимов нагрева плат различной геометрии и массы;

- проблемы пайки участков платы, на которые не попадает прямое ИК излучение (затененные участки);

- проблемы защиты поверхности ИК излучателей от испаряющихся при пайке флюсов.

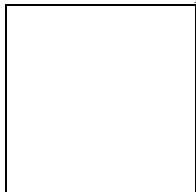
Первые разработки в области применения ИК нагрева для пайки основывались на использовании в качестве излучателей инфракрасных ламп с температурой излучающего тела, превышающей 800–1100°С. Так как температура пайки обычно находится в диапазоне 210–215°С, то режимы нагрева значительно отличались от равновесных, что приводило к возникновению перегретых участков на поверхности платы, связанной с различной степенью черноты, массой компонентов и других причин. Лампы ИК излучения представляют собой вольфрамовую спираль, размещенную внутри герметичной кварцевой трубки или шара, наполненных инертным газом. Чаще всего они устанавливаются внутри рефлектора, отражающего излучение на нагреваемый объект. Лампы и рефлекторы излучают в основном ИК энергию среднего, меньше ближнего и совсем мало дальнего спектра. Эта энергия составляет более 90% энергии, идущей на нагрев тела. Так как воздух практически прозрачен для ИК излучения, то он практически не нагревается, поэтому конвективная составляющая, также как и кондуктивная, минимальны.

Основные достоинства метода нагрева с помощью ламп ИК излучения – высокая скорость нагрева, очень низкая инерционность нагревателей, возможность оперативного изменения температурно-временного профиля нагрева, относительная простота обслуживания и самого оборудования.

Атмосфера в зоне ИК пайки также оказывает влияние на ее качество. Чаще всего ИК установки работают в условиях воздушной атмосферы, однако присутствие кислорода в зоне пайки не всегда желательно, так как может происходить окисление припоя и разрушение органических материалов. Поэтому при пайке в воздушной атмосфере ограничивается длительность цикла нагрева, который не должен превышать 100–150 с. Перспективно применение при ИК пайке инертной среды: азот с малым содержанием кислорода и водородно-азотная смесь. При этом улучшается качество пайки за счет исключения окисления припоя, повышения активности флюса. Возрастает также краевой угол смачиваемости флюса, что уменьшает его количество, затекающего под

корпуса элементов, остаточные ионные загрязнения на платах, упрощает очистку печатных плат.

В общем случае поток лучистой энергии, достигая поверхности тела, частично поглощается, частично отражается и частично проходит через него:



(10.1)

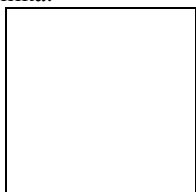
Специфика нагрева металла лучистой энергией определяется высокой концентрацией в них свободных электронов, которые служат источниками вторичных волн. Коэффициент отражения и поглощения зависит от длин волн, электропроводности металла и температур. С увеличением частоты колебаний световой волны отражающая способность металлов уменьшается и большая часть излучения поглощается, таким образом энергетически выгодно использовать более коротковолновую часть спектра.

Энергетическими параметрами пучка лучистой энергии являются:

- максимальная плотность лучистого потока в центре фокального пятна E_{2m} , Вт/м²;
- энергетическая мощность излучателя (лампы), P_x (Вт);
- энергетический КПД, η (%);
- коэффициент сосредоточенности лучистого потока, K (1/м²)

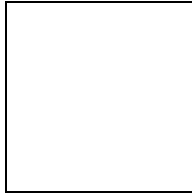
Эти параметры определяются пространственным распределением плотности лучистого потока в фокальном пятне на двунаправленных направлениях $E_2(x, y)$ или по радиусу пятна $E_2(r)$. Распределение плотности лучистого потока в фокальном пятне оптического источника теплоты приближенно описывается уравнениями [83]:

- для нормально-кругового источника:



(10.2)

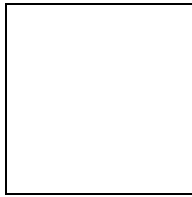
- для нормально-полосового источника ограниченной длины L:



(10.3)

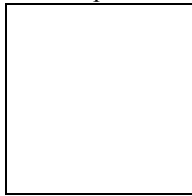
Интегральный лучистый поток в фокальном пятне рассчитывают по следующим уравнениям:

- для нормально-кругового источника:



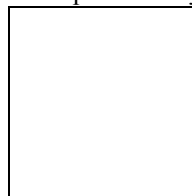
(10.4)

- для нормально-полосового источника ограниченной длины L:



(10.5)

Пайка ИК излучением обеспечивает возможность бесконтактного нагрева на воздухе, в контролируемой газовой среде или в вакууме. Интенсивность спектрального излучения I зависит от температуры T , длины волны источника и спектральной степени черноты излучателя:



(10.6)

где C_1 , C_2 - постоянные Планка, соответственно равные 3,74 мВт/кв.м и 0,1439 м К.

Температура нити кварцевых ламп с иодным циклом составляет обычно 2000–3500К, а диапазон теплового лежит в пределах длин волн 0,76–1000 мкм. Падающее на металлическую поверхность ИК-излучение незначительно проникает вглубь и в основном отражается от его поверхности. Нормальная отражательная способность гладких

поверхностей чистых металлов зависит от их электропроводности ρ и температуры поверхности T :

$$\xi = 1 + 0,1\rho T. \quad (10.6)$$

В инфракрасной области спектра с увеличением электропроводности металлов их отражательная способность возрастает до 98%. Среди чистых металлов полированное серебро, медь, алюминий являются лучшими отражателями и поэтому используются для изготовления рефлекторов в установках ИК нагрева, которыми осуществляют фокусировку излучения в рабочей зоне.

Количество тепла, поглощенного поверхностью тела под действием ИК нагрева, определяется законом Стефана-Больцмана [332]:

$$Q = E_u E_m S F K (T_u^4 - T_n^4), \quad (10.7)$$

где E_u - эмиссия источника нагрева, E_m - поглощение материала, S - площадь нагрева, F - фактор эмиссии источник/нагретое тело, K - константа Стефана-Больцмана, T_u , T_n - температуры источника и тела соответственно.

Фактор эмиссии показывает способность источника излучать радиационную энергию и способность объекта поглощать их энергию. Фактор, равный 1,0, соответствует наиболее совершенному излучателю (черное тело) и совершенному поглотителю. Обычно, этот комбинированный фактор приблизительно равен 0,8–0,9 для обычных ламп и печатных плат.

Нагрев инфракрасным излучением в целях пайки имеет ряд технологических преимуществ, однако их реализация зависит от правильно сконструированной установки ИК нагрева. В настоящее время широкое применение в технологических процессах пайки получили два вида ИК нагрева: локальный сфокусированный и прецизионный рассеянный. В зависимости от конкретных условий используют различные по геометрии рефлекторы, формирующие тепловое поле в зоне нагрева. Для локального нагрева целесообразны отражатели эллиптической формы, фокусирующие излучение источника света, помещенного в ближнем фокусе рефлектора на объект нагрева в дальнем фокусе (рис. 10.1,а). В зависимости от типа излучателя 1 рефлекторы 2 формируют фокальное пятно в виде круга (для точечных), либо полосы (для линейных излучателей) (рис. 10.1,б), причем плотность ИК излучения, а следовательно, и температура в фокальном пятне убывает по мере удаления от центра по закону Гаусса [333].

В условиях прецизионного нагрева достигается высокая

равномерность температуры в результате многократных переотражений излучения объекта. Для установок периодического или непрерывного (конвейерного) типа используются овално-цилиндрические рефлекторы, которые особенно эффективны для низкотемпературной групповой пайки. Для ограничения зоны нагрева и снижения температурного влияния на паяемые элементы применяют сопловые насадки с внутренней отражающей поверхностью (рис. 10.1,в), либо применяют защитные диафрагмы.

В качестве источника ИК излучения используют галогенные лампы мощностью 100–650 Вт для точечных и 1000–5000 Вт для полосовых излучателей. Для галогенной лампы КИ220–1000 при питающем напряжении 220 В максимальная спектральная интенсивность излучения достигает 63 Вт/стер.мкм на длине волны 1,1 мкм [334].

Применение сфокусированного ИК излучения позволяет осуществить локальный нагрев в зоне диаметром 2–3 мм или узкой полосе шириной до 5 мм со скоростью 30–50 град/с при интенсивности излучения 100–120 Вт/см².

Для ИК нагрева в технологии РЭА в большей степени используют узкий диапазон длин волн от 1 до 5 мкм, который в свою очередь делится на коротковолновый или ближний от 1 до 2,5 мкм, и средневолновый от 2,5 до 5 мкм.

Закон смещения Вина определяет пик волновой эмиссии W_p :

$$W_p = K_w / T_u, \quad (10.8)$$

где K_w – константа Вина (5215,6 мкм·°С), T_u – температура излучателя.

Таким образом, более высокая температура излучателя приведет к более короткой длине волны и как результат увеличенной тепловой эмиссии. Коротковолновый диапазон ИК-излучения позволяет более быстро нагревать объекты, поскольку согласно закону смещения Вина максимальная величина спектральной интенсивности излучения с повышением температуры сдвигается в сторону более коротких волн.

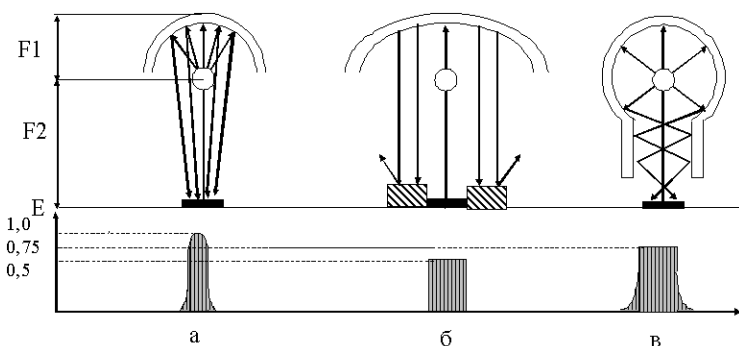


Рис. 10.1. Конструкции отражателей ИК-излучения: фокусирующий (а), диффузный (б), с сопловой насадкой (в)

Для защиты поверхности отражателя и лампы от паров флюса предусмотрено использование либо съемного кварцевого стекла, либо прокачка горячего воздуха в пространстве между отражателем и диаграммой. С целью обеспечения непрерывной длительной работы рефлектор охлаждается водой с расходом 0,4 л/мин.

Способ пайки ИК излучением высокопроизводителен, инвариантен к типу паяемого изделия (корпус ИМС, печатная плата), экологически чист (не загрязняет окружающую среду), позволяет программировать режимы нагрева и вести пайку в любой контролируемой атмосфере, например нейтральной или защитной, газовой [335,336].

Недостатками ИК нагрева являются: низкая локальность зоны нагрева, недостаточная интенсивность, повышенное время процесса пайки, нагрев не только паяного соединения, но и обширной прилегающей зоны, что приводит к термической деструкции диэлектрика печатной платы, а также радиоэлементов. Во избежание термического разрушения печатной платы применяют специальные защитные маски, металлические экраны, теплоотводящие оправки.

В связи с миниатюризацией электронных компонентов и устройств, все большее внимание приобретает качество монтажа компонентов на печатных платах. Несмотря на то, что технологии пайки постоянно совершенствуются, требования к качеству монтажа растут еще быстрее. Большие трудности возникают при пайке печатных плат с плотным размещением поверхностно-монтируемых компонентов SMD (Surface Mounted Devices). Такая ситуация заставляет производителей изделий электроники искать новые технологии, способные повысить качество

пайки, увеличить ее скорость и снизить стоимость [39,40].

До сих пор применяемая технология ручной пайки компонентов с помощью различных конструкций паяльников и паяльных станций отличается универсальностью, высокой гибкостью, однако имеет высокую трудоемкость, низкую скорость и высокую стоимость монтажа. Использование современных микросхем и пассивных компонентов в миниатюрных корпусах для поверхностного монтажа в значительной степени затрудняет процесс монтажа ввиду плотной компоновки элементов, необходимости точного их позиционирования на плате. Поэтому область применения ручной пайки ограничена мелкосерийным производством и ремонтными работами.

Широко применяемая технология групповой пайки волной припоя в полной мере удовлетворяет требованиям монтажа выводных компонентов, монтируемых в отверстия платы, однако для плотного поверхностного монтажа ввиду значительного количества таких дефектов, как мостики и наплывы припоя, эффект «затенения» компонентов, она применяется меньше. Широкое применение поверхностного монтажа в изделиях электроники потребовало использования разработки новых технологий групповой пайки.

Одной из первых таких технологий стала пайка компонентов в конвекционных печах, где оплавление припоя осуществлялось за счет нагрева его потоком горячего воздуха. В установках пайки с принудительным конвективным теплообменом (Forced Air Convection Reflow) тепло к монтируемым платам передается посредством конвективной теплоотдачи принудительно перемещающимся с малой скоростью нагретым воздухом [337]. Скорость нагрева в таких системах определяется разностью температур между нагретым воздухом и печатной платой. Вследствие большой тепловой инерционности конвекционные печи имеют конвейер, движущийся с небольшой скоростью, по которому платы проходят через несколько зон нагрева. Такая технология требует предварительного нанесения на контактные площадки, как паяльной пасты, так и приклеивания компонентов к поверхности платы, чтобы при обдуве горячим воздухом не произошло их смещения. Одним из недостатков этой технологии является разогрев до температуры пайки всей платы. В конвекционных печах практически невозможно точно выдерживать температурный профиль, что требуется для пайки корпусов типа BGA [336].

Пайка оплавлением дозированного припоя в парогазовой фазе (Vapor-Phase Reflow) или конденсационная пайка получила широкое применение в технологии поверхностного монтажа начиная с 1973 г. в

разработках фирм Du Pont и Western Electric Company прежде всего благодаря хорошей совместимости со всеми технологическими операциями нового процесса монтажа [338]. Этот метод позволяет осуществлять групповую пайку SMD в бескислородной, негорючей среде с контролируемыми условиями нагрева. Одной из важных особенностей такого процесса является независимость режимов нагрева от геометрической формы и размеров плат. Широко рекламируемый в свое время процесс пайки SMD в парогазовой фазе ввиду ряда недостатков, таких как, дефицитность инертных жидкостей, разогрев до температуры пайки всей платы и компонентов, низкая скорость нагрева, экологические проблемы разложения жидкости и др. значительно сократили области его применения [339].

Следующим шагом в развитии технологий пайки стало создание ИК печей, которые по сравнению с конвекционными обладают значительно меньшими габаритами (ввиду отсутствия конвейера) и лучшими возможностями по поддержанию необходимого температурного профиля пайки. При использовании ИК печей стало возможным не приклеивать компоненты к плате. Однако разогрев всей платы до температуры пайки остался, поэтому все устанавливаемые на плату компоненты должны быть в состоянии выдерживать в течение нескольких десятков секунд температуру до 300 °С.

Наиболее совершенной в настоящее время технологией пайки является локальная инфракрасная, где нагрев производится сфокусированным пучком ИК излучения только в местах пайки. Еще в 1970 г. Costello D.J [340] предложил технологию ИК пайки микросхем в плоских корпусах на плату с фокусировкой излучения по 2-м зонам расположения выводов. Установки локальной ИК пайки, как правило, состоят из двух нагревателей, один из которых подогревает плату снизу до сравнительно невысокой температуры, и верхнего, осуществляющего в нужный момент быстрый локальный нагрев требуемой области платы до температуры плавления припоя. Фокусируемая пайка более всего подходит для проведения ремонтных работ с использованием микросхем в корпусах BGA, а также для монтажа и демонтажа компонентов в труднодоступных местах. Применение ИК пайки является новым перспективным направлением в технологии поверхностного монтажа (SMT), которое обеспечивает уменьшение затрат на эксплуатацию оборудования при одновременном повышении качества паяных соединений [341].

Перспективен для монтажа электронных компонентов на печатные платы метод нагрева световым лучом дуговых ксеноновых ламп

сверхвысокого давления [342,343] . Эти источники света имеют спектр излучения с длинами волн 0,2–2,4 мкм. Такое излучение более эффективно для нагрева металлов, чем ИК излучение ламп накаливания и излучение лазера, так как коротковолновая часть спектра лучше поглощается металлом контактной площадки, припоем, выводами и покрытиями радиоэлементов и в меньшей мере поглощается диэлектрической основой. Оборудование для нагрева световым лучом менее энергоемко по сравнению с лазером, его энергетический КПД составляет 30–40 %, оно сравнительно просто по конструкции и удобно в эксплуатации.

Для фокусирования излучения источников света при пайке перспективны оптические системы на основе эллипсоидных отражателей [344]. Оптическая система с излучателем ДКсШ - 500 мощностью 500 Вт позволяет расщепить пятно нагрева на два равных пятна с плотностью энергии в каждом 240 Вт/см^2 . Расстояние между центрами пятен может изменяться от 0 до 35 мм в зависимости от паяемого элемента. На основе разработанной оптической системы создана установка для пайки элементов на печатные платы световым лучом дуговых ксеноновых ламп. Для диаметра вывода 0,6 мм максимальная плотность лучистого потока 250 Вт/см^2 , время пайки при этом составило 0,3 с. Печатная плата последовательно перемещается от одного соединения до другого с остановкой на время пайки и подачи импульса излучения. При автоматической пайке производительность процесса в среднем составила 50–60 паек/мин. При одновременной двусторонней пайке расщепленным лучом с максимальной плотностью лучистого потока в каждом пятне нагрева, равной 200 Вт/см^2 , обеспечивается производительность до 400 соединений в минуту [84].

Световой луч от дуговой ксеноновой лампы применен для герметизации пайкой корпусов электровакуумных приборов диаметром 144 мм из сплава 50 Н с помощью низкотемпературного припоя ПОС 61, что обеспечило ремонтпригодность корпуса. Собранный корпус устанавливали во вращатель, нагрев осуществляли от лампы мощностью 5 кВт при скорости вращения 8–12 м/ч. Герметизация корпуса осуществлялась за один оборот, температура нагрева внутренней полости не превысила 70°C [345]. Эффективно также применение светового луча для пайки элементов поверхностного монтажа на печатных платах [346].

10.2. Оборудование и процессы инфракрасной пайки соединений

Разработан и внедрен в производство ряд печей конвейерного типа различной конструкции, мощности, габаритов и способа нагрева, для низкотемпературной пайки, сушки и отжига ИЭТ при температурах до 600⁰С. Конвейерная печь ПГЗН-ИМП-600-2 предназначена для пайки электронных компонентов на платы при монтаже микросборок, гибридных интегральных схем, а также для сборки и герметизации ИЭТ пайкой низкотемпературными припоями в среде инертных газов, термообработки ИМС, сушки клеев, лаков, компаундов [336].

Установки ИК пайки RT C 830 фирмы Radiant Technology Corp. (США), снабжены микропроцессорной системой управления с функциональной клавиатурой и дисплеем, обеспечивающих регулирование и отслеживание всех параметров процесса. Фирма Panasonic (Япония) выпускает установку ИК пайки модели NM-2632, в которой кроме зоны ИК нагрева имеется зона УФ нагрева и зона охлаждения вентиляторами. Характеристики некоторых установок ИК пайки представлены в табл. 10.1.

Таблица 10.1

Техническая характеристика установок ИК пайки

Наименование параметра	ПГЗН-	NM-2632	OmniFlex
	ИМП 600-2	Panasonic	Electrovert
Минимальная ширина ПП, мм	140	250	508
Скорость конвейера м/мин	0,05–0,5	0,45–1,8	0,5–1,5
Время предварит. нагрева, с	5–25	40	30–40
ИК пайки, с	1–6	5–10	5–15
Диапазон температур пайки, ⁰ С	150–600	210–270	100–400
Потребляемая мощность, кВт	10–30	18	0,5–1,0
Масса, кг	310	500	329

ИК нагрев, обеспечивая высокие скорости нагрева изделий, создает и значительные температурные градиенты, которые отрицательно влияют на надежность электронных сборок, выполненных на керамических подложках. Лучшим компромиссом для пайки керамических плат является сочетание нагрева нижней стороны платы теплопроводностью до 140⁰С, а верхней – ИК излучением. При этом температурные градиенты не превышают 1– 4⁰С/с.

В последние годы более широкое применение находят панельные излучатели Panel IR System, работающие в среднем и дальнем спектре излучения 3–10 мкм. Конструктивно такие излучатели представляют собой нагреваемые керамические панели больших размеров, работающие при температуре 200–450⁰С. Такие установки содержат

воздушные камеры или камеры с инертным газом. Поэтому 60% тепловой энергии к нагреваемым объектам доставляется за счет конвекции, а 40% за счет ИК излучения среднего и дальнего спектра. Малая разница температур излучателя и нагреваемого объекта обеспечивает нагрев в режиме, близкому к равновесному, в связи с этим метод находит в настоящее время широкое применение в технологии поверхностного монтажа. В данном случае теряются такие достоинства лампового ИК нагрева, как безинерционность, гибкость регулирования режимов и другие [347].

В настоящее время в технологии ИК пайки применяются три разновидности конструкций установок, отличающихся видом нагревателей: ламповыми, панельными и с их комбинированным применением. Установка с ламповыми излучателями содержит зону нагрева, в которой установлен ряд трубчатых ИК ламп, снизу и сверху транспортера, на котором размещаются монтируемые платы (рис.10.2).

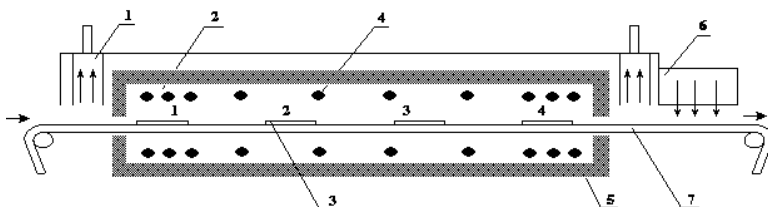


Рис. 10.2. Установка ИК лампового нагрева: 1 – вытяжная вентиляция, 2 – матрица ИК ламп, 3 – плата, 4 – ИК лампа, 5 – отражатель, 6 – устройство охлаждения, 7 – конвейер

Лампы заключены в отражающий рефлектор и зоны нагрева образуются наборами ламп. В зоне предварительного нагрева и зоне оплавления располагается большее количество ламп, что позволяет создать большую плотность ИК излучения. Во второй зоне лампы располагаются реже, что обеспечивает плавный режим нагрева и выравнивание температуры компонентов. Для удаления летучих соединений, образующихся при пайке, на выходе и входе из зоны нагрева находится система вытяжной вентиляции. На выходе также имеется система принудительного охлаждения плат.

Аналогичную конструкцию имеют установки с панельным ИК нагревом (рис. 10.3), которые отличаются заменой ИК ламп керамическими панелями различной мощности, что также позволяет осуществлять формирование необходимого температурно-временного профиля нагрева, но не с такой степенью гибкости. Конструкция ИК

панельного нагревателя включает в себя три слоя. Лицевая сторона, обращенная к нагреваемой плате, может изготавливаться из стекла, керамики или металла. В зависимости от применяемого материала она может выполнять функции вторичного излучателя или прозрачного окна. В первом случае излучающие свойства будут уже определяться не первичным нагревателем, а материалом лицевого слоя. Второй слой или первичный нагреватель обычно изготавливается в виде фольги или спирали из резистивного материала. Третий слой является изоляционным и выполняется из тугоплавкой керамики.

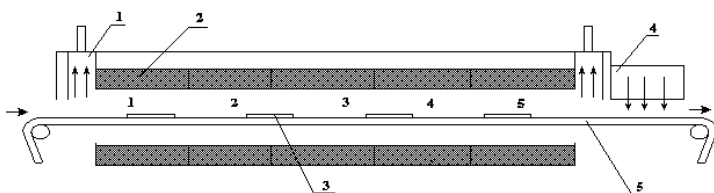


Рис. 10.3. Установка ИК панельного нагрева: 1–вытяжная вентиляция, 2–панельные нагреватели, 3–устройство охлаждения, 4–конвейер, 5–плата

В ИК установке панельного типа нагрев производится как за счет излучения, так и за счет конвекции, потому что ИК излучение в спектре 5-8 мкм хорошо поглощается воздухом. Установки такого типа могут содержать несколько зон предварительного нагрева с расположением нагревателей с одной или с двух сторон конвейера. Увеличение количества зон позволяет увеличивать скорость конвейера. Следует отметить, что ввиду комбинированного нагрева панельные нагреватели обеспечивают более равномерный нагрев плат, кроме того, средний и дальний ИК спектр не чувствителен к цвету нагреваемых объектов (при температуре ниже 600°C). Такие нагреватели также меньше чувствительны к нагрузке зоны нагрева. Недостатками этих установок является их инерционность к изменению режимов и профиля зоны нагрева, так как каждая из панелей имеет неравномерное температурное поле по площади поверхности. В частности, панели с металлической лицевой частью имеют более низкую температуру по краям, в то время как панели с прозрачной для ИК излучений лицевой поверхностью, наоборот, имеют большую температуру в зоне кромок.

Большую гибкость и возможность использования преимуществ лампового и панельного нагрева обеспечивают комбинированные системы (рис. 10.4). Установка состоит из корпуса, внутри которого

располагаются панельные и ламповые ИК нагреватели, образующие необходимое количество зон нагрева. В первой и второй зонах осуществляется предварительный нагрев с помощью панельных нагревателей, обеспечивающих заданную температуру.

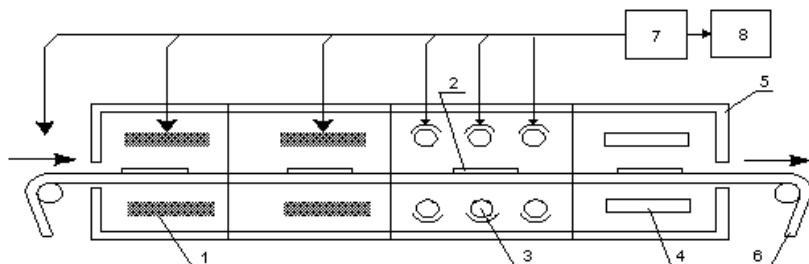


Рис. 10.4. Установка ИК нагрева комбинированного типа:
1 – панельные нагреватели; 2 – печатная плата, 3 – кварцевые ИК лампы, 4 – охлаждающее устройство, 5 – корпус, 6 – конвейер, 7 – микропроцессор, 8 – дисплей

Расплавление припойной пасты происходит в третьей зоне с помощью кварцевых ИК ламп, после чего изделие охлаждается в четвертой зоне. Печатные платы транспортируются через установку на ленточном (обычно сетка из нержавеющей стали) конвейере. Установка снабжена встроенной микропроцессорной системой, с помощью которой выполняется программное управление режимами нагрева плат, контроль всех систем с отображением результатов на дисплее. В памяти компьютера может храниться библиотека типовых режимов оплавления для печатных плат различных типоразмеров.

Одним из наиболее известных производителей оборудования использующего технологию сфокусированного ИК излучения в своих системах с 1986 года является фирма PDR из Великобритании (подразделение Eurotec Industries, занимающееся паяльным оборудованием), которая является одним из ведущих производителей оборудования для пайки печатных плат выполненных по технологии поверхностного монтажа. Оптическая система паяльной станции фирмы PDR (рис. 10.5) формирует коротковолновое ИК пятно с красной подсветкой для удобства наведения. Размер пятна устанавливается с большой точностью системой оптических линз. Цифровой контроллер управления с бесконтактным датчиком температуры обеспечивает температурный профиль. В нижней части устройства расположен набор кварцевых нагревательных элементов средневолнового диапазона

излучения осуществляющий подогрев платы. Управление мощностью верхнего (150 Вт) и нижнего ИК излучения (600–1200 Вт) производится согласно тепловому профилю [348].

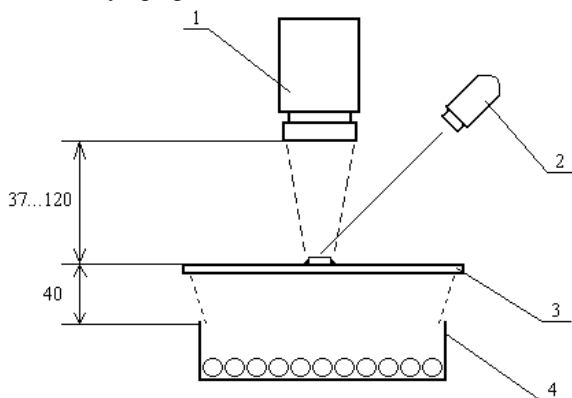


Рис. 10.5. Устройство паяльной станции фирмы PDR: 1 – ИК оптическая система, 2 – пирометр, 3 – печатная плата, 4 – кварцевый подогреватель

Одной из разработок фирмы PDR (рис.10.6), является ремонтный центр IR-X410 для организации рабочего места монтажа или демонтажа любых SMD, включая как соединители, так и чип компоненты, а также для пайки и демонтажа BGA микросхем с размерами от 25 мм до 70 мм.



Рис. 10.6. Паяльная система IR-X410

Прецизионный вакуумный установщик микросхем гарантирует точность позиционирования, а ручной вакуумный пинцет используется для снятия микросхем. Контроль нагрева микросхемы осуществляется в

реальном времени. Программное обеспечение позволяет установить любой температурный профиль с возможностью контроля температуры в восьми точках. Для обеспечения равномерного нагрева платы нижний подогреватель имеет увеличенный размер 240×300 мм. Используется микрометрический позиционер платы для точной установки микросхем. Технические характеристики системы приведены в табл. 10.2.

Таблица 10.2

Характеристики паяльной станции IR-X410

Параметр системы	Значение параметра
Верхний ИК излучатель, Вт	150
Нижний нагреватель, Вт	600–1200
Напряжение питания, В (Гц)	110(50) / 240(60)
Типы компонентов	BGA, micro-BGA, QFP, PLCC, SOIC, small SMD
Область нижнего нагревателя, мм	120×300 и 240×300
Габаритные размеры, мм	1400×600
Вес, кг	65

Примером оборудования среднего класса могут служить полуавтоматические паяльные станции серии PDR 1500. Станции этой серии различаются между собой наличием некоторого дополнительного оборудования и приспособлений (вакуумного пинцета, координатного стола, системы прецизионного подъема компонентов), а также использованием в станции PDR 1500 XY+PC персонального компьютера для управления процессом пайки. Все станции серии PDR 1500 состоят из нижнего нагревателя мощностью 500 Вт и верхнего фокусируемого нагревателя мощностью 150 Вт, установленного на штативе. При этом в верхнем нагревателе могут использоваться различные сменные линзы, обеспечивающие фокусировку инфракрасного излучения на пятне диаметром от 4 до 70 мм. Область нагрева нижнего нагревателя имеет размер 120×120 мм. Использование персонального компьютера для управления процессом пайки и контроля температуры в реальном времени позволяет очень точно выдерживать требуемый температурный профиль. Станции серии PDR 1500 применяют для монтажа и демонтажа компонентов в корпусах BGA, micro BGA, QFP, PLCC, SOIC, пассивных SMD компонентов, а также панелек и разъемов [349].

ЗАО ЦНИТИ «Техномаш-Трасса» выпускает установку ИК пайки

SMD-TRASSA-5609 (рис. 10.7), основные параметры которой приведены в табл.10.3 [350]. Установка имеет пять зон нагрева. В зонах предварительного нагрева осуществляется двусторонний нагрев с возможностью отключения нижних нагревателей.

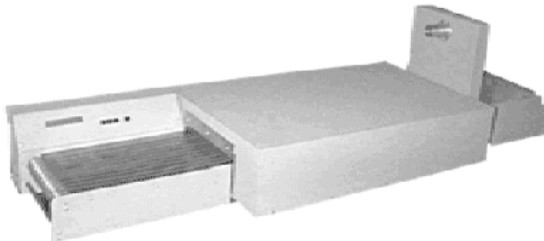


Рис. 10.7. Установка ИК пайки SMD-TRASSA-5609

Установка снабжена микропроцессорной системой управления, позволяющей поддерживать заданные режимы пайки, сохранять в памяти до десяти температурных профилей, а также конвейером с регулируемой скоростью движения. Имеется возможность подключения компьютера для отображения температурных профилей на мониторе. Значения всех параметров отображаются на жидкокристаллическом индикаторе. Предусмотрена возможность подключения вытяжной вентиляции.

Фирмой Narotek AG (Швейцария) выпущена настольная камерная печь ИК нагрева ECOSOLD 350 SUPERIOR (рис. 10.8) (табл. 10.4) для пайки печатных плат комбинированным методом. В установке используется два типа нагревателей. Четыре ИК лампы по 1000 Вт сверху и шесть керамических нагревателя по 400 Вт снизу.

Таблица 10.3

Параметры установки SMD-TRASSA-5609

Параметр установки	Значение параметра
Температура предварительного нагрева, °С	100–270
Температура в зоне оплавления, °С	100–300
Время достижения рабочей температуры, мин	20
Ширина конвейера, мм	250
Скорость движения конвейера, мм/мин	100–300
Напряжение питания, В (Гц)	220 (50)
Потребляемая мощность, кВт	1,5
Габаритные размеры, мм	1630×465×180
Масса, не более, кг	40



Рис. 10.8. Камерная печь ИК нагрева ECOSOLD 350 SUPERIOR.

Сочетание двух видов излучения коротковолнового ИК от ламп и длинноволнового от керамических нагревателей, а также вентиляторов для подачи горячего воздуха в зону пайки позволяет уменьшить неравномерность разогрева платы и устранить эффект затенения для компонентов с большими корпусами. Особенности установки:

- программное обеспечение для компьютерного контроля режимов;
- графическое отображение термопрофиля и времени пайки на мониторе ПК;
- поток воздуха, протекающий через боковые нагреватели, предотвращает непрогрев краев ПП и затенение BGA, QFP и др.;
- расположенные внизу камеры оплавления источники темного излучения, работающие в течение всего процесса пайки, поддерживают идеальный температурный режим основания платы, что важно при пайке BGA, QFP и др.;
- расположенные сверху камеры источники светлого ИК излучения включаются на несколько секунд при наступлении режима оплавления;
- режим отверждения адгезивов.

Таблица 10.4

Характеристики установки ECOSOLD 350 SUPERIOR

Параметр установки	Значение параметра
Система нагрева	Комбинированная ИК + конвекция
Нагреватели:	
- сверху,	4 кварцевых
- снизу	6 керамических
Термопрофиль:	
время предварительного нагрева, с;	0–200
время оплавления, с;	0–200

температура предварительного нагрева, °С.	0–300
Охлаждение	обдувом
Производительность, европлат/час	до 40
Подача ПП в зону пайки	автоматическая
Размеры печатной платы, мм	до 350×500
Электропитание, В(Гц)	400(50) / 230(60)
Габаритные размеры, мм	1225×56×390
Вес, кг	50

Наибольшую популярность получило технологическое оснащение фирмы ERSA, поставляющая на рынок оборудование различного класса. Фирмой разработана конвекционно-инфракрасная настольная печь камерного типа для мелкосерийных производств ТТ-500А (рис. 10.9) [351], которая имеет 28 термопрофилей с возможностью их перепрограммирования. Размер плат помещаемых в печь до 330×400 мм с высотой компонентов на плате до 40 мм. Вес установки 35 кг, питание однофазное 220В(50Гц). Печь фабрично укомплектована двумя контактными термосенсорами для отладки термопрофилей, в дополнение к штатному измерителю температуры воздуха в центре камеры, все показания режимов отображаются на ЖК-дисплее.



Рис. 10.9. Конвекционно-инфракрасная настольная печь ТТ-500А

Фирма ERSA производит антистатический универсальный центр с программируемым термопрофилем для ИК локальной пайки и демонтажа компонентов IR550А (рис.10.10). Установка IR550А предназначена для пайки и демонтажа SMD, в том числе в корпусах

BGA, а также контактной пайки и выпаивания средствами встроенного модуля Digital2000A с опционными расширениями (MicroTool, Pincette40, PowerTool, CU100A, MIC608A).

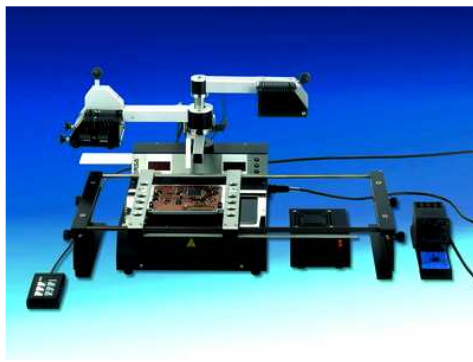


Рис. 10.10. Универсальный центр IR550A

Станция оснащена верхним ИК излучателем 800Вт, интегрированным вентилятором охлаждения, и нижним ИК излучателем 800Вт для предварительного прогрева печатных плат. Поле верхнего ИК излучателя – 60×60 мм, нижнего – 135×260 мм. Возможность регистрации термопрофиля в ПК и загрузки параметров из ПК, а также бесконтактное инфракрасное или контактное измерение температуры в рабочей зоне. Программное обеспечение включено в поставку. В комплект входит высокоскоростной паяльник TechTool с подставкой. Конструкционная совместимость с видеоустановщиком PL550AU и системой RPC для визуального контроля процесса пайки в реальном времени. Для автономного использования, без PL550A/AU или RPC550A, станцию IR550A следует укомплектовать столиком-держателем плат.

Научно-производственное предприятие «КВП Радуга» (Россия) производит оборудование и оснащение для поверхностного монтажа. Одна из установок пайки «Радуга-10» предназначена для оплавления припойных паст при сборке печатных узлов с применением поверхностно монтируемых изделий. Установка осуществляет пайку как с одной стороны, так и одновременно с двух сторон печатной платы. Технические характеристики установки приведены в табл. 10.5. Установка состоит из нагревательной камеры с регулируемой температурой плоских нагревателей и пульта управления, внешний вид которых приведен на рис. 10.11. Конструкция установки

предусматривает ручную подачу печатных плат на специальном подплатнике. Электрооборудование установки «Радуга-10» состоит из устройств регулирования температурного режима, задания временного интервал и измерителя температуры.

Таблица 10.5

Технические данные установки «Радуга-10»

Наименование показателя	Значение
Максимальная температура нагревателей, °С	350
Максимальные габариты обрабатываемых плат, мм	270×350
Точность поддержания температуры на поверхности нагревателей, °С	
Габаритные размеры, не более, мм:	±1
длина x ширина x высота Максимальная	840x470x310
потребляемая мощность, кВт	2
Масса, не более, кг	35



Рис. 10. 11. Установка пайки «Радуга-10»

Конструктивно электрооборудование установки реализовано в виде отдельных блоков нагревателя и управления. Измеритель температуры регулирующий ТРМ-10 совместно с микропроцессорным управлением обеспечивает повышенную точность поддержания температуры. Значения температуры на поверхности нагревателей, находящихся в нагревательной камере, измеряются при помощи термопары градуировки ХК и используются в качестве входных параметров системы регулирования. Термопара закреплена непосредственно на поверхности нагревателя.

Узел задания времени пайки состоит из цифрового таймера МТЦ 3501 и звонка, который включается таймером по истечении заданного

интервала времени. Контрольный измеритель температуры предназначен для определения температурного режима печи и интервала времени, в течение которого необходимо производить пайку конкретного печатного узла. Для этой цели применен цифровой измеритель ИТ 2511.

Конвейерная установка ИК пайки «Радуга-21» состоит из 5-ти зонной нагревательной камеры с регулируемой по зонам температурой пайки инфракрасных нагревателей; конвейера с регулируемой скоростью для подачи печатных плат с установленными элементами в нагревательную камеру; пульта управления; загрузочного и разгрузочного устройств; электрооборудования. Конструкция установки предусматривает ручную подачу ПП на специальном подплатнике, который входит в комплект установки.

В состав электрооборудования установки входит система регулирования температурного режима для задания и регулирования температуры в нагревательной камере. Основным элементом системы является измеритель температуры регулирующий ТРМ-10. Значения температуры на поверхности нагревателей, находящихся в камере, измеряются при помощи термопары и используются в качестве входных параметров системы регулирования. Термопары закреплены непосредственно на поверхности нагревателей.

Система управления конвейером предназначена для изменения скорости и направления движения конвейера. Установка имеет ширину конвейера 400 мм, длину нагревательной камеры 1100 мм, регулировку скорости конвейера от 0.015 до 2 м/мин, равномерность нагрева платы шириной 350 мм $\pm 2^{\circ}\text{C}$ (рис.10.12).



Рис. 10.12. Внешний вид конвейерной установки ИК пайки «Радуга-21»

При современной тенденции микроминиатюризации электронной аппаратуры актуальной задачей является использование технологии поверхностного монтажа, которая позволяет осуществлять

высокоскоростную автоматическую установку и пайку компонентов с высокой надежностью вне зависимости от сложности аппаратуры. В настоящее время для поверхностного монтажа большое распространение получили паяльные установки фирм PACE, Cooper Tools (США) и ERSA (Германия). Фирма ERSA производит универсальный настольный комбайн IR500А для монтажа и демонтажа компонентов в корпусах типа BGA, CSP, PGA, SOIC, QFP, PLCC .

ИК нагрев выгодно отличается тем, что имеет более простое и дешевое оборудование, которое намного экономичнее, следовательно более целесообразно для поверхностного монтажа изделий.

В условиях перехода к бессвинцовым технологиям пайки, отличающимся более высокими температурами эффективны ИК печи с принудительной конвекцией. Конвекционные ИК печи Hotflow имеют от 6 до 12 зон нагрева с постоянным и равномерным потоком воздуха с помощью специальных сопел, что создает минимальный разброс температуры по ширине рабочей зоны. Скорость конвейера составляет 0,2–2,0 м/мин, температурный профиль нагрева контролируется автоматически [352].

Промышленность также выпускает автоматические установки для светолучевой пайки, где в качестве излучателя используются лампы ДКсШ-200 с металлическим отражателем, обеспечивающие пятно нагрева до 2,5 мм мощностью до 240 Вт/см². Используется импульсный режим работы при непрерывном перемещении платы в фокальной плоскости установки. В зоне пайки лампа горит в рабочем режиме, а после прохождения ее - в дежурном. При этом термическое воздействие на основание печатной платы незначительно. Для пайки используется припой ПОС 61, либо напессованный на все выводы с одной стороны микросхемы, либо в виде колец или полос перфорированного припоя, надеваемого на выводы. Примерами установок являются стационарные типа: УСПЛЭ–1–МАТИ, УСС–1, УСЛТ–1 с лампами мощностью 3–10 кВт, мобильные типа: УССЛЛ–2, ССО–2 с лампами мощностью 2 кВт.

Разработан малогабаритный ручной ИК паяльник на основе кварцевой галогенной лампы накаливания КГМ–220–1000 и эллиптического отражателя, обеспечивающего максимальную концентрацию лучистого потока в зоне пайки (до 120 Вт/см²) [353] . Медная зеркальная поверхность отражателя покрыта защитной кремнийорганической пленкой. Для защиты поверхности отражателя и лампы от паров флюса используется кварцевое стекло. С целью обеспечения непрерывной работы корпус паяльника охлаждается водой с расходом 0,4 л/мин.

10.3 Оптимизация температурных профилей ИК нагрева

Для поверхностного монтажа разработано устройство ИК пайки (рис. 10.13), состоящее из основания с вмонтированным в него нижним, и верхнего ИК нагревателей [354]. Нижний ИК нагреватель мощностью 1 кВт, размещенный под платой, предварительно разогревает ее до температуры 100°C за 20–40 с. Верхний ИК излучатель нагревает монтируемые компоненты с заданной скоростью (5–15°C/с) до установленного значения в пределах 220–60°C в зависимости от вида монтажа. Он оснащен оригинальной системой фокусировки теплового излучения, позволяющей обеспечить равномерное температурное поле.

В качестве источников ИК энергии использовались галогенные лампы: верхнего нагрева - типа КГМ400–36 с площадью нагреваемой поверхности 3,5 см², нижнего подогрева - типа КИ1000–220, включенные последовательно. ИК излучение с длиной волны 2–8 мкм оптимально в плане соотношения отражаемой и поглощаемой тепловой энергии темными и светлыми поверхностями объекта.

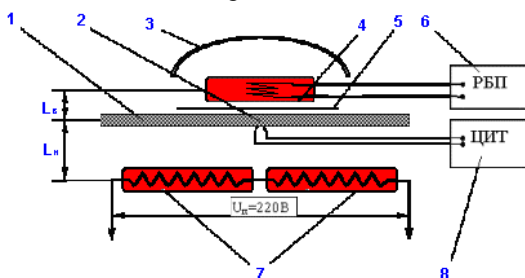


Рис. 10.13. Схема установки ИК пайки: 1 – плата, 2 – термопара, 3 – рефлектор, 4 – верхний ИК нагреватель, 5 – маска, 6 – регулируемый блок питания, 7 – нижний ИК нагревателя, 8 – цифровой измеритель температуры

Под действием сфокусированного ИК нагрева происходит оплавление паяльной пасты, нанесенной заранее на контактные площадки платы. Температурный датчик, закрепленный на плате, автоматически отключает нагрев после достижения заданной температуры.

В качестве образца паяемого изделия использована печатная плата с металлизированными отверстиями диаметром 2 мм, заполненными припоем ПОС61 массой 1 г. В металлизированные отверстия

закреплялись микротермопары типа ХК, которые подсоединялись к цифровому измерителю температуры М930G. Исследуемые технологические параметры в рабочей зоне: скорость нарастания температуры, интенсивность нагрева, локальность нагрева определялись в диапазоне от 200 до 400° С.

Верхний ИК рефлектор, закреплённый на поворотной штанге, ориентировали на центр рабочей зоны, размеры которой определялись типом рефлектора верхнего излучателя. Затем плату, фиксированную в специальной рамке, сдвигали по направляющим в рабочую зону так, чтобы монтируемый элемент оказался в ее центре. Нижним ИК нагревателем, размещённым под платой в основании устройства, нагревали плату до температуры 100–120°С за 20–60 с. После этого включали верхний ИК нагреватель и увеличивали температуру в зоне выводов с заданной скоростью 5–12° С/с до установленного значения в пределах 220–260°С в зависимости от вида платы. Экспериментально исследовались процессы пайки таких элементов как чип – резисторы P1-8M, P1-8МП размерами 3,2x1,6x0,7, а также диоды, стабилитроны, конденсаторы, микросхемы. Светоотражающей маской из алюминиевой фольги экранировали поверхность платы от ИК излучения, обеспечивая локальность нагрева.

Исследованы зависимости скорости нагрева от мощности ИК нагревателей. Зависимости изменения температуры в зоне пайки от времени при расстояниях 10 мм до излучателей представлены на рис. 10.14. Скорость нагрева от верхнего нагревателя типа КГМ-400-36 с рефлектором составляет 3–5°С/с; от верхнего и нижнего нагревателя типа КИ-1000-220 – 10°С/с; от верхнего нагревателя с рефлектором и экраном и нижнего нагревателя типа КИ-1000-220 – 15°С/с. Рост температуры в рабочей зоне происходит во времени линейно и пропорционально мощности нагревателя при прочих равных условиях. Применение маски несколько повышает скорость нагрева за счет отражения, при этом увеличивая степень локализации нагрева. Дальнейшее увеличение скорости нагрева возможно за счет улучшения качества параболических рефлекторов, повышения их отражающей способности, снижения коэффициента поглощения ИК излучения.

Проведены исследования скорости нагрева от расстояния до ИК нагревателя. На рис. 10.15 приведены графические зависимости температуры в зоне пайки от времени при различных положениях верхнего ИК нагревателя. Скорость роста температуры в зоне пайки при $L_B=15\text{мм}$ – 6,4°С/с; 25мм – 4°С/с и 35мм – 3,2°С/с. На рис. 10.16 приведены графические зависимости температуры в зоне пайки от

времени при различных положениях нижнего ИК нагревателя. Скорость роста температуры в зоне пайки при $L_H = 10\text{мм} - 12^\circ\text{C}/\text{с}$; $20\text{мм} - 8^\circ\text{C}/\text{с}$; $30\text{мм} - 5,5^\circ\text{C}/\text{с}$; $40\text{мм} - 3^\circ\text{C}/\text{с}$; $50\text{мм} - 0,8^\circ\text{C}/\text{с}$ и $60\text{мм} - 0,4^\circ\text{C}/\text{с}$. Из результатов исследований следует, что увеличение скорости роста температуры замедленно убывает при росте расстояния до нагревателя.

Исследованы тепловые поля зоны нагрева при расстоянии до верхнего ИК нагревателя 10 мм. На рис.10.17,а изображены изотермические зоны: центральная со скоростью нагрева $>5^\circ\text{C}/\text{с}$ имеет форму круга, последующие зоны – овалы, что обусловлено прямоугольной формой ($20 \times 30\text{мм}$) рефлектора.

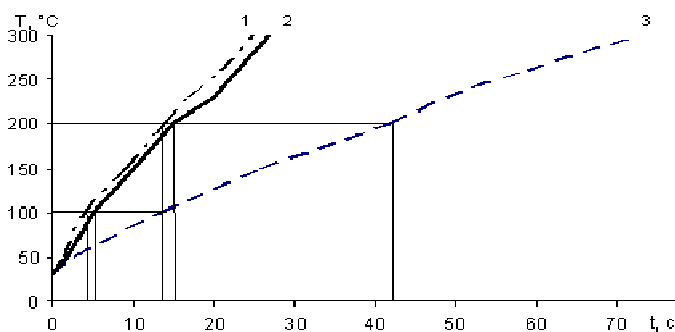


Рис. 10.14. Временные зависимости температуры в зоне пайки от различных источников нагрева: 1– двух нагревателей и маски, 2 – верхнего и нижнего нагревателей , 3 – верхнего нагревателя

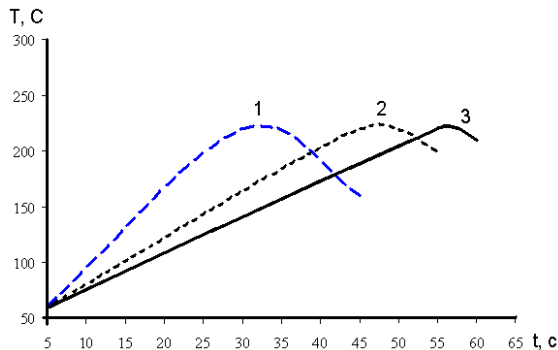


Рис. 10.15. Временные зависимости температуры в зоне пайки от расстояния до верхнего ИК излучателя: 1 – 15 мм, 2 – 25 мм, 3 – 35 мм

На рис. 10.17,б изображены зоны теплового поля ИК нагревателя с маской прямоугольной формы 4×4 мм. Изотермы имеют квадратную форму со стороной: 6мм при $V > 3 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{c}$, 12мм при $V = 2,2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{c}$ и 18 мм при $V < 1 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{c}$. Применение экранов различной формы позволяет на порядок увеличить локальность нагрева без снижения его скорости.

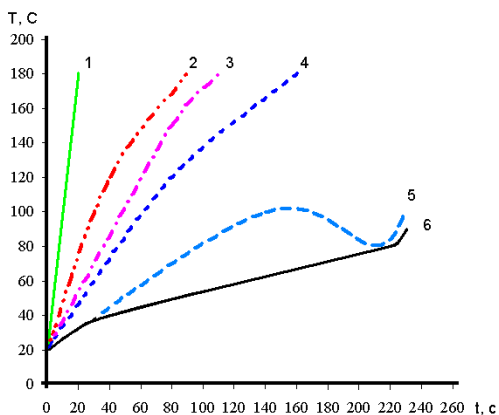


Рис. 10.16. Температурные зависимости в зоне пайки от расстояния до нижнего ИК излучателя: 1 – 10 мм, 2 – 20 мм, 3 – 30 мм, 4 – 40 мм, 5 – 50 мм, 6 – 60 мм

Наибольшая скорость нагрева $15^{\circ}\text{C}/\text{с}$ достигается при уменьшении расстояния от платы до верхнего ИК нагревателя до 10мм. Применение качественного отражающего рефлектора для ИК источника позволяет при той же интенсивности нагрева вдвое уменьшить потребляемую мощность и заменить водяное охлаждение воздушным принудительным. Повышение локальности ИК нагрева за счет светоотражающей маски не оказывает существенного влияния на скорость роста температуры, уменьшая в целом только нагрев платы.

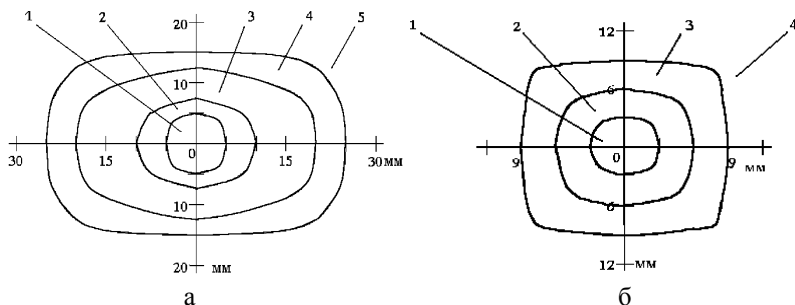


Рис. 10.17. Зоны теплового поля при скоростях нагрева для верхнего излучателя(а): 1→ $5^{\circ}\text{C}/\text{с}$; 2→ $5^{\circ}\text{C}/\text{с}$; 3→ $3,8^{\circ}\text{C}/\text{с}$; 4→ $3,3^{\circ}\text{C}/\text{с}$; 5→ $2,2^{\circ}\text{C}/\text{с}$; нижнего (б): 1→ $4^{\circ}\text{C}/\text{с}$; 2→ $2,2^{\circ}\text{C}/\text{с}$; 3→ $1,1^{\circ}\text{C}/\text{с}$; 4→ $0,5^{\circ}\text{C}/\text{с}$

Оптимальные режимы ИК пайки следующие: предварительный подогрев нижним ИК нагревателем ($L_{\text{Н}}=10\text{мм}$) платы до $90\text{--}110^{\circ}\text{C}$ в течении 12–17 с со скоростью $6\text{--}8^{\circ}\text{C}/\text{с}$, нагрев платы совместно верхним ($L_{\text{В}}=10\text{мм}$) и нижним ($L_{\text{Н}}=10\text{мм}$) ИК нагревателями до температуры пайки ($160\text{--}260$) со скоростью $10\text{--}14^{\circ}\text{C}/\text{с}$. При необходимости локализации нагрева при пайке термочувствительных элементов может быть применена светоотражающая маска. Режимы пайки плат определяются температурным профилем, который для паяльных паст на основе сплава Sn/Pb оптимизирован для печей ИК нагрева (рис. 10.18).

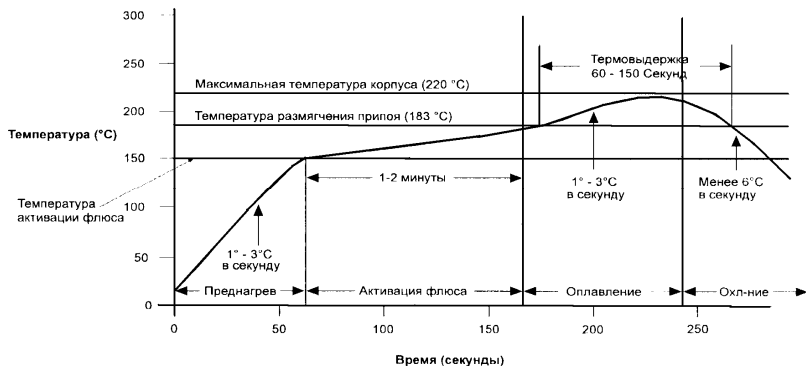


Рис. 10.18. Рекомендуемый температурный профиль оплавления паяльных паст

Стадия предварительного нагрева снижает тепловой удар на электронные компоненты и печатные платы. В процессе предварительного нагрева происходит испарение растворителя из паяльной пасты при скорости роста температуры не более 1–3°/с. Высокая скорость нагрева может приводить к преждевременному испарению растворителя, входящего в состав паяльной пасты, и к целому ряду дефектов: повреждение компонентов за счет теплового удара, разбрызгивания шариков припоя и возникновению перемычек припоя. Разница температуры предварительного нагрева и температуры оплавления не должна превышать 100°С.

Стадия стабилизации активизирует флюсующую составляющую и удаляет избыток влаги из паяльной пасты. Повышение температуры на этой стадии происходит очень медленно для нагрева всех компонентов на плате до одинаковой температуры. На стадии активации флюса происходит удаление оксидной пленки с паяемых поверхностей. Время прохождения платой этого этапа составляет 60–120 с. Если стадия стабилизации проводится не достаточное время, результатом могут быть дефекты типа “холодная пайка” и эффект “надгробного камня”. Скорость роста температуры не должна превышать 0,6°/с.

На стадии оплавления температура повышается до расплавления паяльной пасты и происходит формирование паяного соединения. Для образования надежного паяного соединения максимальная температура пайки должна на 30–40°С превышать точку плавления паяльной пасты и составлять 205–225°С. Для предотвращения таких дефектов как холодная пайка или перемычки припоя необходимо выдержать

температуру корпусов электронных компонентов выше температуры расплавления припоя в течение 60–150 с. На этапе пайки максимальная температура корпусов может держаться 10–30 с. Скорость роста температуры от момента достижения платой температуры плавления припоя до максимальной температуры не должна превышать 1–3°C/с.

Быстрое охлаждение уменьшает образование интерметаллидных соединений, однако нельзя забывать о термических напряжениях, приводящих к повреждению компонентов при большой скорости охлаждения. Скорость охлаждения платы не должна превышать 6°C/с. Окончательный выбор режимов производится исходя из конструкции печатной платы, типа и размеров компонентов, количества компонентов на печатной плате, особенностей используемого оборудования, результатов экспериментальных паяк, типа паяльной пасты.

Окончательный выбор режимов производится технологом исходя из конструкции печатной платы, типа и размеров компонентов, количества компонентов на печатной плате, особенностей оборудования, результатов экспериментальных паяк, типа паяльной пасты.

Пайка поверхностно монтируемых электронных компонентов с использованием бессвинцовых паст требует применения малоинерционных ламповых ИК источников среднего диапазона излучения, а также более точного индивидуального температурного профиля нагрева каждого типоразмера платы с помощью микроконтроллера [355].

Для повышения процента выхода годных изделий применяют технологию двустороннего поверхностного монтажа, в которой припойную пасту через трафарет наносят на обе стороны печатной платы, установку элементов на припойную пасту ведут с дополнительной фиксацией на обратной стороне платы, после чего следует двусторонняя пайка в ИК печи [356]. По этой технологии выпущена контрольная партия микромодулей и проведен контроль количества дефектов по сравнению с технологией одностороннего монтажа. Результаты сравнения распределений дефектов микромодулей, изготовленных по двум технологиям, представлены в виде диаграммы Парето [357] (рис.10.19). Как видно из диаграммы, применение двустороннего поверхностного монтажа при сборке микромодуля позволило существенно уменьшить число дефектов связанных с непропаем паяемых вручную элементов. Это стало возможным благодаря уменьшению количества ручных операций сборки и замене их на групповые. Что касается таких видов дефектов как: неисправность элемента, непропаи чипов, дефект платы, то их

число осталось прежним. Присутствие таких дефектов можно объяснить особенностями температурно-временных режимов пайки на установке «Радуга 7»:

- высокая скорость предварительного нагрева приводит к возникновению перемычек припоя за счёт изменения вязкости припойной пасты и замыканию чипов;

- высокая температура стадии стабилизации уменьшает активность флюса и, следовательно, ухудшает паяемость и приводит к разбрызгиванию шариков припоя на стадии пайки;

- большая продолжительность стадии оплавления приводит к значительным тепловым нагрузкам компонентов и вызывает их неисправность или платы;

- медленная скорость охлаждения снижает прочность паяных соединений.

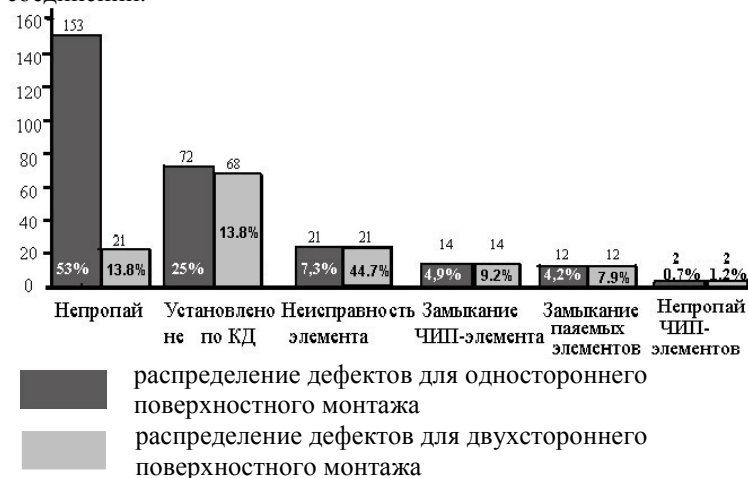


Рис. 10.19. Диаграмма Парето для дефектов поверхностного монтажа

Замыкание чипов так же может быть вызвано неточным их позиционированием на контактные площадки платы или смещением элементов при транспортировке по технологической линии. Для исключения смещения нужно использовать усовершенствованную внутрицеховую тару, а для точного позиционирования применять при установке элементов автоматы-укладчики.

ИК нагрев в промышленной печи фирмы ERSА применен для формирования межсоединений при двухстороннем поверхностном монтаже [358]. В микромодулях с двухсторонним поверхностным

монтажом межсоединения выполняют через сквозные отверстия, которые не должны находиться в области контактных площадок, потому что в результате смачивания туда затекает припой. При монтаже элементов с матричными выводами на контактные площадки над отверстиями для повышения плотности монтажа необходимо исключить проникновение припоя в отверстия и уменьшение его дозы. Отверстия размером 0,4 – 0,7 мм выполнялись сверлением в плате из FR4 с двухсторонней металлизацией, меньших размеров от 150 до 300 мкм – при помощи лазера. В матрицах из 10x10 и 13x13 отверстий металлизация медью выполнялась электрохимическим путем, затем на две матрицы наносился никель, а на две других – золото.

Материалом для формирования соединений была выбрана бессвинцовая паста фирмы Multicore состава Sn–3,8Ag–0,7Cu, а для пайки SMD – паста фирмы COBAR S62-XM3S со следующими данными: состав 62Sn–36Pb–2Ag, содержание припоя 90,30%, частицы припоя размером 25 - 45 мкм, содержание флюса 9,66%. Для бессвинцовых паст при лазерном сверлении отверстий с диаметром менее 300 мкм заполнение припоем отверстий при всех видах покрытий отсутствует. Для SMD с матричными выводами возможен переход на нижележащий уровень под контактной площадкой, если диаметр отверстий меньше 250 мкм.

Таким образом, для поверхностного монтажа все большее применение получают ИК паяльные установки, которые благодаря своим функциональным возможностям способны эффективно выполнять монтаж и демонтаж компонентов в корпусах типа BGA, CSP, PGA, SOIC, QFP, PLCC .

10.4. Оборудование и процессы лазерной пайки соединений

Для лазерной пайки используют твердотельные ОКГ, выполненные на ИАГ (иттриево-алюминиевом гранате) с длиной волны $\lambda=1,06$ мкм и газовые лазеры на CO₂ с длиной волны 10, 6 мкм различной мощности [359]. Уровень мощности: 5–10 Вт, время пайки 0, 2–0, 5 с, фокусировка в зону диаметром 0,3–1,5 мм. Предпочтительны одиночные импульсы или последовательности импульсов с частотой до 10 Гц.

Припой на выводы элементов и контактные площадки наносится дозировано путем напрессовки проволочного припоя диаметром 0, 4 мм либо нанесением паяльной пасты трафаретной печатью. Оптимальные режимы пайки для лазера ЛТН-102А: скорость перемещения координатного стола 4–7 мм/с, мощность излучения 26–30 Вт, диаметр

луча в фокальной плоскости 2, 5–4,0 мм. В таком режиме полное время пайки одного вывода не более 1 с, припой в соединении имеет мелкодисперсную структуру, интерметаллиды не успевают образовываться [360, 361]. Пределы регулирования мощности лазерного излучения 16–125 Вт, нестабильность мощности луча не более 3 %, нестабильность размеров пятна на плате - не более 3,5 %. Координатные столы автоматов лазерной пайки обеспечивают погрешность позиционирования не хуже $\pm 0,1$ мм.

С увеличением диаметра вывода компонента от 0,5 до 1,3 мм время лазерной пайки растёт от 0,7 до 1, 3 мин при энергии излучения 50 Дж. Производительность процесса при использовании координатного стола составляет до 60 соед/ мин [362].

В результате исследований установлено, что оптимальными режимами процесса лазерной пайки ИМС с планарными выводами являются: мощность излучения 24 Вт, диаметр пятна нагрева 3,0 мм, скорость перемещения платы 7 мм/с. При таких режимах обеспечивается высокое качество паяных соединений, воздействие лазерного излучения не оказывает отрицательного влияния на электроизоляционные свойства диэлектрика печатных плат. Производительность пайки матричных больших интегральных схем с шагом выводов 0, 625 мм при этом составляет до 330 соед/мин [363].

Лазерное излучение обеспечивает возможность прецизионной пайки "чиповых" конденсаторов, монтируемых поверхностью на платы. Размеры зоны пайки 1,3x0,5 мм, время пайки не более 0,6 с. Кратковременный нагрев и точное позиционирование лазерного луча ограничивает зону термического влияния при пайке безвыводных элементов на платы. Для пайки используется лазер на основе Nd с излучением в ближайшей ИК - области и длиной волны 1, 6 мкм (его энергия адсорбируется сплавами Pd-Sn, Sn-Ni в количестве 79 % энергии излучения) [364].

Оптимальный угол падения лазерного луча составляет 45–50°, что обеспечивает равномерный нагрев компонента и контактной площадки, а также расплавление припойной пасты. Паяные соединения, сформированные за весьма короткое время (0,2–0,6 с), почти не содержат хрупкого интерметаллида Cu_2Sn , и поэтому выдерживают большие тепловые циклические нагрузки и имеют более высокую надежность [365].

Групповая пайка контактных выводов ИМС к ленточному носителю из медной фольги осуществлена лазерным излучением с помощью специальной оптической системы (рис. 10.20), трансформирующей

лазерный луч в несколько световых потоков. Луч лазера 1 от ОКГ типа ЛГ–36, проходя через телескопическую систему из цилиндрических линз 2 расширяется, и полностью засвечивает блок цилиндрических линз 3. Центральная часть луча проходит блок 3 без изменения, попадает на второй блок линз 4, согласующую линзу 5 и преобразуется в две параллельные полосы излучения. Периферийная часть луча, выделяемая блоком 3 в виде двух других параллельных полос, с помощью зеркала 6 направляется на объектив 7. Сформированное с помощью согласующей линзы и объектива лазерное излучение в виде замкнутого контура фокусируется в зоне пайки. Под микроскопом 8 с необходимым увеличением выходы ленточного носителя совмещают с шариковыми выводами ИМС и со сформированным контуром луча. При длительности импульса 4 мс пороговая плотность энергии плавления прирпия ПОВИ–0,25 составила 25 Дж/см² [366].

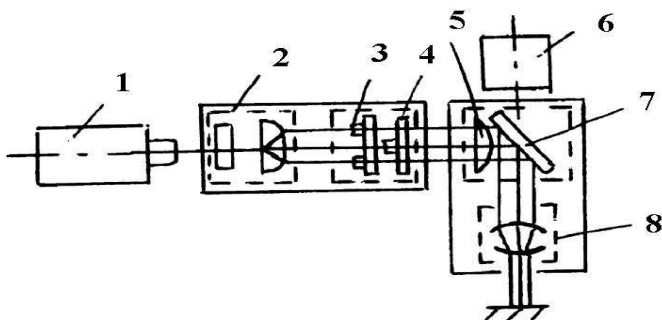


Рис. 10. 20. Схема лазерной пайки с трансформацией светового потока

При использовании паяльной пасты при лазерной пайке, ее масса находится в прямой зависимости от мощности и времени излучения. При мощности излучения 25 Вт увеличение времени облучения от 0,5 до 5 с вызывает расплавление дозированной массы пасты от 50 до 300 мг. Угол смачивания слабо зависит от времени излучения в диапазоне от 0,2 до 1,4 с и составляет в среднем 18–25° [367].

В исследовательском центре фирмы ИВМ (Нью-Йорк) разработана технология «сухой» (бесфлюсовой) пайки, активированной лазерным излучением в виде импульсов длительностью 12 нс с интенсивностью 10 Дж/м². Нагрев подложек осуществлялся в атмосфере метилбромида СН₃В при давлении около 10 Па. Под действием лазерного излучения инициировался фотолит газовых молекул, химически активные

компоненты которых реагировали с окислами на припое и паяемых деталях с образованием летучих соединений, легко удаляемых из зоны пайки. Подложки нагревались излучением в местах паек до температуры, превышает температуру плавления припоя на 30-40⁰С. Такая технология не имеет недостатков флюсовой пайки: разбрызгивания припоя, образования пустот в паяном шве, необходимости очистки деталей от флюса. Для «сухой» пайки могут быть использованы газовые атмосферы $\text{CH}_3 \text{J}$, $\text{CF}_3 \text{J}$, $\text{CH}_3 \text{Cl}$ и др. [368].

Фирма Vanzetti Systems (США) разработала серию установок PLS-7000, которые отличаются работой в прерывистом режиме с нагревом каждого соединения во время остановки координатного стола, а также способностью активно регулировать процесс нагрева по длительности в зависимости от тепловых характеристик соединения, определяемых количеством припоя. Для этого установки снабжены ИК - детектором, системой обратной связи ЭВМ. При диаметре пятна лазерного луча 0, 6 мм пайка каждого вывода занимает 50–150 мс. ЭВМ сравнивает информацию, поступающую от ИК - детектора, с характеристикой соединения конкретного размера и формы, выдает информацию о дефектных соединениях в форме распечатки [364].

Для низкотемпературной пайки используют установки многоточечной пайки с голографическим делением луча. В этом случае луч лазера, генерируемый ОКГ 1, с помощью телецентрической оптики 2 сначала расширяется до значительного диаметра, а затем направляется как плоскопараллельный на голограмму 3. Для каждого процесса пайки необходима специальная голограмма, содержащая информацию о том, на какое количество элементарных лучей должен быть разложен пучок и в каких точках сфокусирован каждый из них. Отражаясь от плоского зеркала 4 лучи лазера , направляются на участки пайки с высокой степенью локальности.

Для пайки легкоплавкими припоями изделий электронной техники достаточна мощность 5 Вт, выделяемая в зоне протекания процесса. Одним импульсом промышленного лазера мощностью 20–50 Вт можно одновременно в нескольких точках [366]. При использовании лазерных установок целесообразно применять в качестве припоев покрытия, которые, оплаваясь, образуют соединения. Схема лазерной пайки представлена на рис. 10.21.

Для монтажа плоских квадратных корпусов ИМС, имеющих 100 выводов с шагом 0,65 мм и шириной 0,3 мм на печатные платы, фирмой NEC Согр. (Япония) разработана автоматизированная установка на базе ИАГ лазера мощностью 270 Вт, связанного оптическим кабелем с

системой, формирующей две зоны нагрева длиной 0–23 мм и шириной 1–2 мм на расстоянии 0–40 мм. В состав установки также входят автоматические загрузчики и укладчики изделий, конвейер, контроллеры, видеокамеры на ПЗС. Время пайки при мощности излучения 150 Вт составляло в среднем 3–7 с на корпус QFP [369].

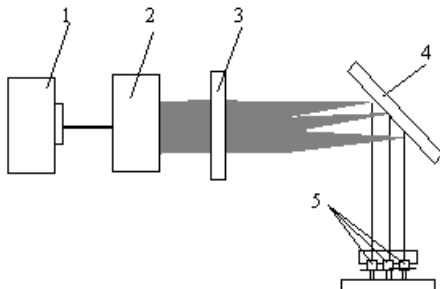


Рис. 10.21. Схема лазерной пайки

Роботизированный технологический комплекс лазерной пайки выполнен на базе малогабаритного сверлильно-зенковального станка ОФ-99 с программным управлением и твердотельного лазера непрерывного излучения ЛТН-102А [370]. В целях удобства управления стойка числового программного управления заменена микропроцессором И-3901, смонтированным непосредственно на пульте управления станка. Схема синхронизации обеспечивала прерывание лазерного луча при его прохождении зоны пайки.

Максимальная производительность при условии обеспечения требуемого качества достигнута при скорости перемещения лазерного луча 8,6 мм/с. При более высоких скоростях процесс пайки становится нестабильным (рис. 10.22).

Исследовался процесс лазерной пайки ИМС в корпусах с планарными выводами типов 401.14, 402.16, а также матричных БИС (МаБИС) серии КА1843, имеющих 108 выводов с шагом 0,625 мм на контактные площадки двусторонних печатных плат [371]. Мощность лазерного излучения регулировалась в пределах 20–120 Вт изменением тока поджига. Нестабильность мощности излучения была не более 3%, нестабильность размеров пятна на выводах ИМС – не более 3,5%.

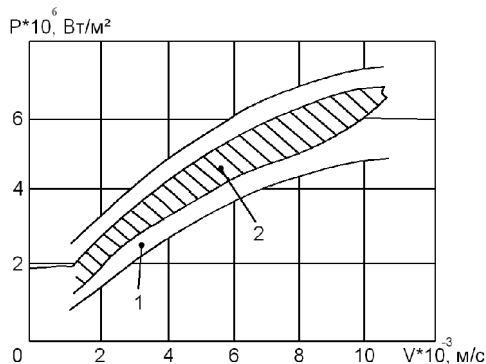


Рис. 10.22. Области допустимых режимов лазерной пайки

Координатный стол с помощью шаговых двигателей обеспечивал позиционирование выводов ИМС относительно луча не хуже $\pm 0,1$ мм с нестабильностью скорости перемещения не более 2,5%. Скорость перемещения платы программировалась и автоматически менялась в соответствии с программой. Фиксация коваровых выводов относительно контактных площадок обеспечивалась магнитной системой, расположенной под печатной платой и создающей магнитное поле с напряженностью $(16-20) \cdot 10^4$ А/м, которое обеспечивало фиксацию ИМС и МАБИС. Для наблюдения использована малогабаритная телевизионная система на базе телевизора «Электроника – 100», формирующая увеличенное в 15 раз изображение рабочей зоны. Это исключило необходимость прямого наблюдения через окуляр оптической системы СОК-1, а также повысило удобство работы и безопасность оператора.

Подготовка выводов включала их формовку, опрессовку припоем ПОС 61 диаметром 0,4 мм, для других партий на места будущих паяк через трафарет наносилась паяльная паста ПЛ-1 с содержанием припоя по массе 75% и максимальным диаметром частиц до 150 мкм. В процессе исследований диаметр луча изменялся на пределах 1,0–2,5 мм, скорость перемещения платы – 4–20 мм/с. Качество паяных соединений оценивали с помощью микроскопа МБС-2 при увеличении $32\times$. Результаты исследований качества паяных соединений показали, что хорошее качество соединений достигается в случае напрессованного припоя при мощности 26 Вт и скорости 4 мм/с, а для пасты – при 24 Вт и 7 мм/с. Применение паяльной пасты снизило требуемую мощность энергии излучения. При пайке также важно обеспечить надежное

контактирование всех выводов ИМС с контактными площадками платы, в противном случае, нанесенный припой оплавится вокруг вывода, а контакт с платой отсутствует.

Тепловой режим, устанавливаемый в зоне пайки, зависит как от мощности лазерного излучения, скорости перемещения луча и его диаметра, так и от количества вносимого в зону пайки припоя. При толщине наносимой паяльной пасты свыше 200 мкм в результате ее разбрызгивания на поверхности платы образуются шарики припоя и перемычки между выводами ИМС. Установлена определенная зависимость массы расплавленной пасты припоя от времени и мощности лазерного излучения. Так для скорости перемещения 4 мм/с и мощности лазера до 30 Вт масса расплава не превышает 2–3 мг в соединении. Увеличение мощности излучения с целью более полного расплавления всей нанесенной пасты приведет к повреждению диэлектрика платы. Отмечена также нестабильность характеристик лазерного излучения в течение длительного срока работы, которая возрастает с увеличением мощности.

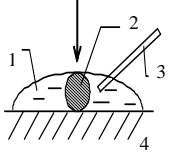
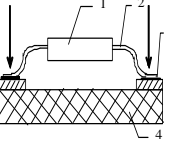
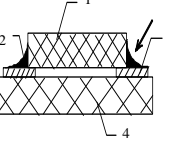
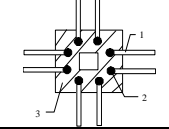
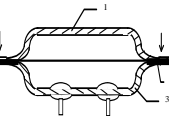
Оптимальными режимами процесса лазерной пайки являются: мощность 24 Вт, диаметр пучка 2,5 мм, скорость перемещения платы 7 мм/с, при которых обеспечивается высокое качество соединений, лазерного излучения не оказывает отрицательного влияния на электроизоляционные свойства диэлектрика печатных плат. Производительность пайки ИМС с шагом выводов 0,625 составляла до 300 соединений/мин.

Применение газовых лазеров на CO_2 с длиной волны 10,6 мкм для процессов пайки электронных компонентов на платы не эффективно вследствие высокого коэффициента отражения блестящего слоя припоя (до 74%), в то время как материал платы и полиимидная изоляции отражают всего 2% [372]. Кроме того, волоконно–оптические линии из кварцевого стекла не прозрачны для этой длины волны, что затрудняет подачу излучения в зону пайки многовыводных компонентов [373].

Технологические особенности лазерной пайки различных изделий приведены в табл. 10.7. В отличие от ряда перспективных способов групповой пайки, при лазерной пайке, как правило, осуществляется раздельное формирование последовательности соединений. Однако с учетом возможности автоматизации процессов контроля, а также ряда других факторов (более высокое качество пайки, расщепление луча и т. д.), общее время монтажа при использовании лазерной управляемой пайки может быть сравнимо с групповой пайкой.

Таблица 10.7

Технологические особенности лазерной пайки

Эскиз соединения	Особенности	Режимы	
	<p>Пайка проводника 3 к поверхности 4, луч концентрируют на шарике припоя 2, нанесен флюс 1</p>	<p><u>Непрерывный</u> $\lambda = 1,06$ мкм $P = 50-60$ Вт $\tau = 1-5$ с</p>	
<p>Элементы с планарными выводами</p> 	<p>Выводы 2 элемента 1 закрепляют на контактных площадках 3 подложки 4. Припой в виде пасты. Луч - на вывод, вывод прижимают к подложке.</p>	<p><u>Непрерывный</u> $\lambda = 1,06$ мкм $P =$ до 60 Вт $\tau =$ до 5 с</p>	
<p>Пайка чипов</p> 	<p>Элемент 1 закрепляют на контактных площадках 3. Луч направляют на пасту 2 под углом к подложке 4 или разделяют на 2 потока и направляют на торцы элемента</p>	<p><u>Импульсный</u> $\lambda = 1,06$ мкм $E = 2-4$ Дж $f = 10$ Гц $\tau = 10$ мс</p>	<p><u>Непрерывный</u> $\tau =$ до 5 с $\lambda = 1,06$ мкм $P =$ до 60 Вт</p>
<p>«Паучок» к шариковым выводам</p> 	<p>Ленточные выводы 1 покрыты припоем 2, на зону 3 формируют излучение в виде контура прямоугольной формы</p>	<p><u>Импульсный</u> $\lambda = 1,06$ мкм $E = 25-90$ Дж $\tau = 4$ мс</p>	
<p>Герметизация корпуса</p> 	<p>Корпус 3 с крышкой 1 сжимают с усилием до 3 Н. Лучи наводят на крышку в зоне нанесения припоя</p>	<p><u>Импульсный</u> $\lambda = 1,06$ мкм $E =$ до 30 Дж $\tau = 7$ мс $d = 5$ мм</p>	

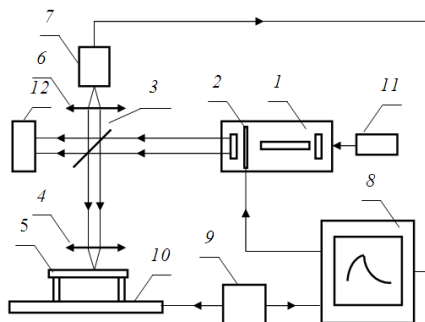


Рис. 10.23. Схема лазерной управляемой пайки

Максимальная плотность мощности лазерного воздействия ограничена процессами газовой выделением в зоне пайки, и при применении стандартных паяльных паст составляет $3\text{--}5 \text{ Вт/мм}^2$. Наиболее перспективной является лазерная управляемая пайка с системой контроля хода процесса (рис. 10.23) [374].

ИАГ лазер 1 с внутрирезонаторным акустооптическим затвором 2 формирует импульс излучения. С помощью поворотного зеркала 3 и объектива 4 энергия излучения передается поверхности изделия 5, которое в ограниченной зоне нагревается до определенной температуры. Во время процесса нагрева-охлаждения ИК-излучение от анализируемого участка линзой 6 передается на охлаждаемый приемник 7. Амплитуда и форма ИК сигнала анализируется по заданной программе компьютером 8. Компьютер через блок управления 9 задает перемещение двух координатного стола 10 с изделием по заданным координатам. He-Ne лазер 11 применен для визуализации объекта воздействия. Для контроля качества соединений служит телекамера системы технического зрения 12.

Процесс пайки включает следующие: нанесение через трафарет паяльной пасты и клея, установку компонентов, автоматизированную пайку выводов, снятие временных характеристик теплового излучения паяных соединений и контроль по ним процесса во времени. При необходимости бракованные соединения допаяются на той же установке. При пайке компонентов монтажа, на которые накладываются жесткие температурные условия, ИК датчик следит за уровнем сигнала (температурой нагреваемого паяного соединения) и при достижении заданного значения отключает лазерный луч.

Оценка качества пайки может осуществляться сравнением измеренных характеристик ИК сигнала с ранее измеренными и заданными характеристиками эталонных паек. Время отдельного измерения определяется типом применяемого радиоэлемента и лежит в интервале 50–100 мс.

Дозирование паяльной пасты оказывает влияние на длительность лазерного нагрева необходимого для пайки. Качественное выполнение лазерной пайки, в условии разброса дозирования массы припоя, возникающего в реальном производстве, требует учета данного фактора. Одним из путей решения данной проблемы является использование автоматического отключения лазерного воздействия через обратные связи во время пайки.

Определена оптимальная длительность лазерного воздействия для двух типов чип–конденсаторов, существенно отличающихся массой и габаритами. При этом руководствовались рекомендациями фирмы Philips, регламентирующими размеры контактных площадок, и высоту галтели паяного соединения при пайке чипов (резисторов и конденсаторов) в зависимости от габаритов (табл. 10.8).

Таблица 10.8

Параметры лазерной пайки чипов разных размеров			
Размеры чип–конденсатора, мм	4×2,5×1	6×4×1,5	8,5×6×1
Масса чипа, мг	55	195	275
Размер контактной площадки, мм	1,5×4,5	1,8×6	2,3×8
Масса паяного соединения, мг	15	23	38
Высота галтели соединения, мм	0,4–0,6	0,4–0,6	0,4–0,6
Размер пятна воздействия, мм	3×2	4,5×2	4,5×2
Мощность излучения, Вт	20	30	30
Длительность лазерной пайки, мс	120	250	310

Для пайки SMT элементов используются лазерные диоды (излучатель), гомогенизатор (смеситель) и пучки световодов (линии передачи и фокусирующие устройства). От каждого лазерного диода отходит световод, которые затем собираются в пучок, формируется суммарный лазерный луч мощностью 4–8 Вт. Длительность облучения 0, 75–1,25 с. Один лазерный диод дает мощность 0, 5–1,0 Вт [375].

Важным преимуществом пайки диодным лазером является его способность фокусировать энергию луча только на рабочем участке при минимальном нагреве близлежащих компонентов. Луч имеет малую зону термического влияния, что приводит к меньшему нагреву платы. Пайка диодным лазером предназначена для использования в тех случаях, когда

теплочувствительные компоненты находятся вблизи места пайки. Результатом быстрого нагрева и охлаждения припоя является мелкозернистая микроструктура припоя с улучшенными механическими свойствами контактных соединений.

В автоматизированных машинах локальной пайки диодный лазер и дуговая нагревательная лампа Хеон были интегрированы в роботизированное устройство. Использовались диодные лазеры мощностью 25 Вт и стандартный волоконно-матричный модуль, состоящий из 19 лазерных диодов, излучающих на длине волны 980 нм, и двух линз: коллимирующей и фокусирующей, которые создавали зону нагрева на расстоянии 33 мм от фокусирующей линзы. В видеуправляемой лазерной паяльной станции лазер был соединен с осью Z декартовой роботизированной системы, в которую была интегрирована микрокамера. На фокусном расстоянии 33 мм луч лазера собирался в точке диаметром 0,8 мм на поверхности печатной платы, изготовленной из материала FR4. Результаты исследований для оловянно–свинцового припоя и стандартной резисторной цепочки показаны на рис. 10. 24 и в табл. 10.9.



Рис. 10. 24. Внешний паяных соединений, полученных при помощи лазера мощностью 25 Вт

Таблица 10.9

Результаты пайки диодным лазером и дуговой лампой

	Время нагрева до плавления, с	Время плавления, с	Время отвердевания, с
Пайка диодным лазером			
Теория	0,016	0,17	0,52
Практика	0,18	0,20	0,56
Пайка дуговой нагревательной лампой			
Теория	0,020	0,25	0,45
Практика	0,18	0,20	0,50

Скорость пайки диодного лазера превосходила скорость короткодуговой нагревательной лампы в 2 раза. Диодный лазер (на 810 нм) может эффективно проникать в припой, уменьшая время необходимое для создания хорошего соединения. Системы пайки диодным лазером могут быть полезны в смешанных областях производства, где имеется потребность в оловянно-свинцовой и бессвинцовой пайке.

Промышленность выпускает ряд автоматов лазерной пайки с программным управлением на базе лазера ЛТН-102А (табл.10.10).

Таблица 10.10

Технические характеристики автоматов лазерной пайки

Параметры	ТС-1061	ПЛП-2	Квант-52	Квант-50-2
Максимальные размеры ПП, мм	500×500	280×280	280×240	430×430
Производительность, соедин/мин	330	330	330	330
Скорость перемещения стола, мм/с	2–15	10	2–20	2, 4–20
Мощность лазерного излучения, Вт	125	125	125	125
Потребляемая мощность, кВт	2–3, 5	2–3	2–3	2–3
Габаритные размеры, мм				
длина	350	1500	3100	3100
ширина	850	1200	900	1200
высота	700	1500	1600	1800

Для наблюдения за процессом лазерной пайки автоматы оснащены малогабаритной ТВ–системой МТУ-1 на базе телевизора Электроника-100, которая формирует увеличенное в 15 раз черно-белое изображение рабочей зоны и исключает необходимость прямого наблюдения рабочей зоны через окуляр оптической системы СОК-1, а также повышает удобство работы и безопасность для зрения оператора.

Установки лазерной пайки должны соответствовать следующим требованиям:

- универсальности в монтаже компонентов различных типоразмеров;
- применения двух лучевой схемы пайки (для предотвращения «вздыбливания» компонента);

- возможности независимого программирования траектории движения лучей и мощности излучения для каждой контактной площадки;
- программной совместимости и возможности встраивания в автоматизированные комплексы поверхностного монтажа;
- возможности контроля качества паяных соединений.

Типовая двух лучевая установка для лазерной пайки включает лазер 1, затвор 2, призматическое зеркало 3, плоское зеркало 4, фокусирующую оптическую систему 5, двухкоординатный стол 6, с установленной на нем монтируемой платой 7. Элементы оптической системы 2-6 аналогичны для каждого луча лазера. Управление работой установки осуществляется от микроЭВМ (рис. 10.25) [376].

В установке применен двух лучевой твердотельный лазер мощностью 60 Вт, работающий в непрерывном режиме. Твердотельные лазеры находят более широкое применение в сравнении с газовыми, так как они имеют более простую и дешевую оптическую систему, возможность фокусирования луча до 25 мкм и менее. Блоки сканирования 8 расположены диагонально относительно паяемого компонента и под углом к поверхности печатной платы, что позволяет проводить пайку корпусов с «J»-образными выводами и однорядных безвыводных компонентов. Позиционирование компонента относительно лучей лазера осуществляется с помощью программно управляемого координатного стола.

Большой интерес представляют также установки лазерной пайки со встроенной системой контроля технологических режимов пайки, один из вариантов которых показан на рис. 10.26. Для пайки применен твердотельный лазер с одновременным сканированием зоны пайки камерой ИК-излучения, которая формирует на экране управляющего компьютера тепловую картину зоны пайки. Все системы установки программно управляемые.

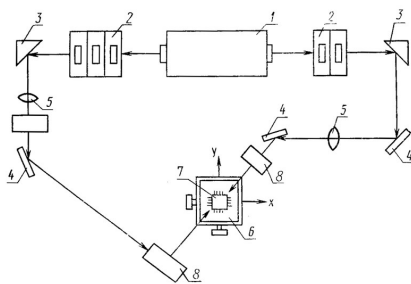
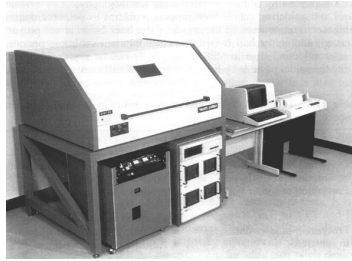
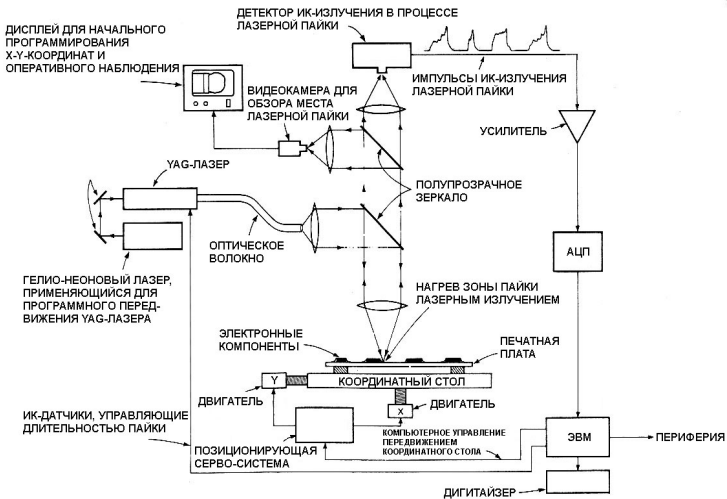


Рис. 10.25. Схема установки лазерной пайки



а



б

Рис. 10.26. Установка лазерной пайки со встроенной системой контроля режимов: а – общий вид, б - схема

Принцип контроля и управления мощностью луча лазера основан на сравнении с эталонными температурными полями различных выводов и компонентов, хранимых в базе данных компьютера. В процессе пайки осуществляется непрерывный мониторинг рабочей зоны ИК камерой. Мощность и длительность излучения регулируется автоматически. Выключение луча лазера осуществляется при идентичности эталонного и текущего температурных полей паяемых выводов.

Повышение качества контроля паяных соединений достигается путем применения лазерной системы контроля дефектов (рис. 10.27). С помощью гелий-неонового лазера устанавливают точное

местоположение контролируемого элемента 3 в системе X-Y координат передвижного столика 4. Контрольные лучи излучает мощный Nd лазер, который работает в инфракрасной области с длительностью излучения, которую задает микропроцессор, управляя шторкой 1.

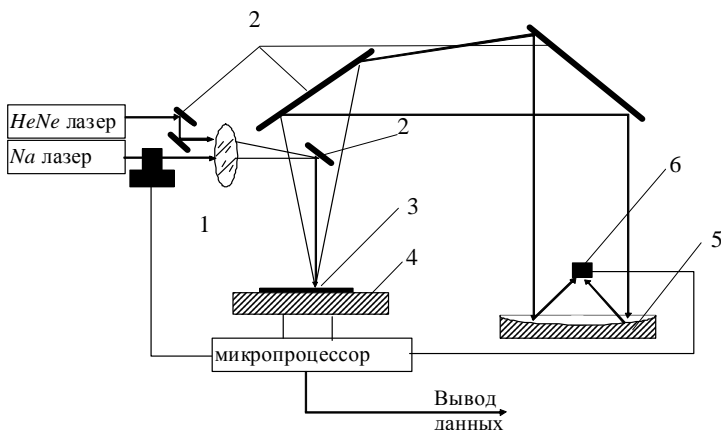


Рис. 10.27. Лазерная система контроля дефектов

Луч, управляемый зеркалом 2, падает на место пайки на контрольном элементе, причем большая часть света отражается, если поверхность пайки блестящая и однородная. Если структура пайки зернистая, то она начинает поглощать энергию луча, нагревается и посылает инфракрасное вторичное излучение. Собранный в линзах 5 и отраженный зеркалом излучение воспринимается ИК датчиком 6, сигнал с которого анализируется с помощью микропроцессора и подается на осциллограф в виде термограммы. С помощью лазерного контроля обнаруживаются такие дефектные соединения, как раковины, внутренние включения, поскольку они имеют меньшую массу и нагреваются по этой причине быстрее, чем сплошные паяные соединения [377].

Устройство лазерного формирования контактных соединений в микромодулях (рис. 10.28) состояло из источника оптического излучения, блоков регулирования энергии излучения, питания и управления, оптической системы и системы охлаждения лазера. В качестве источника оптического излучения применен квантовый генератор на алюмоиттриевом гранате с неодимом с длиной волны 1,06 мкм, длительностью импульсов 0,1 с и частотой следования 1–50 Гц.

Для накачки активного элемента применена ИК-лампа мощностью 2 кВт. Энергия импульса лазерного излучения составляла 0,75 Дж при напряжении на лампе ОКГ 900 В и частоте импульсов 3 Гц, а средняя мощность излучения в импульсе – 3,75 кВт [378].

Оптическая система формировала пространственные характеристики пучка как инструмента обработки. Фокусное расстояние оптической системы составляло 150 мм. Для наводки оптического излучения и юстировки оптической системы использовался маломощный газовый лазер, излучение от которого вводилось в оптическую систему формирования лазерного излучения с помощью полупрозрачного зеркала. Для позиционирования изделий применен координатный стол с двумя степенями свободы и точностью позиционирования $\pm 0,1$ мм. Управление работой лазера и координатного стола организовано от ПЭВМ с помощью управляющей программы. В установке применена двухконтурная система охлаждения лазера с теплообменным устройством типа «вода-вода» с термостабилизацией охлаждающей жидкости, циркулирующей по замкнутому контуру при помощи жидкостного насоса УО-1.

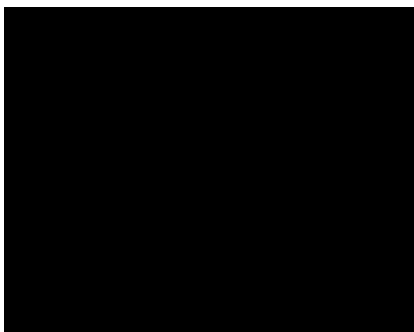
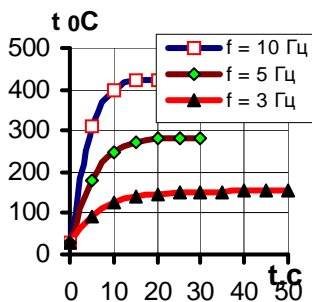


Рис. 10.28. Лазерная установка для исследований процесса пайки

Плотность лазерного излучения определялась косвенным путем по температуре нагрева поверхности с помощью радиометра и двух измерителей температуры б. Радиометр представлял собой печатную плату с металлизированным отверстием, в котором закреплена термопара типа ХК с помощью теплопроводящего клея в глухом отверстии с обратной стороны платы. Прибор MASTECH MV64

регистрировал температуру с точность ± 1 °С в диапазоне от 0 до 1000 °С. Температура нагрева контактных площадок и безвыводных элементов (резисторов, конденсаторов) измерялась термопарой, закрепленной в сквозном отверстии легкоплавким припоем. Для определения влияния лазерного излучения на термочувствительные элементы в зоне воздействия лазерного луча и на определенном расстоянии L от нее размещались две термопары типа ХК, подключенные к разным измерителям температуры.

При средней мощности излучения в импульсе 3,75 кВт и энергии излучения до 2 Дж температура 300 °С в зоне взаимодействия при диаметре пятна излучения 3 мм и частоте импульсов 10 Гц достигалась за 1 - 2 с. Исследовались температурные зависимости паяных соединений от частоты следования импульсов оптического излучения (f , Гц), смещения зоны нагрева от осевой линии излучателя (X , мм), диаметра пятна лазерного излучения на исследуемом объекте (D , мм), степени черноты поверхности (ξ) [379]. Зависимости температуры нагрева от времени облучения и частоты импульсов при различных рабочих частотах ОКГ и напряжении питания ИК лампы накачки 700 В представлены на рис. 10.29,а, от диаметра луча - на рис. 10.29,б. Скорость нарастания температуры на начальном участке пропорциональна частоте импульсов излучения, однако с увеличением времени облучения до 20 с она уменьшается до 5 °С/с. Температура нагрева нелинейно растет с уменьшением диаметра луча в зоне пайки и с увеличением частоты импульсов, что может привести к перегреву, испарению припоя и повреждению изделий.



а

б

Рис. 10.29. Зависимости температуры зоны пайки от времени облучения (а), диаметра луча (б) и частоты импульсов

Таким образом, для сборки электронных микромодулей с плотным поверхностным монтажом все большее применение получают лазерные технологические установки, способные эффективно выполнять монтаж и демонтаж различных компонентов (рис.10.30), в том числе в корпусах типа BGA, CSP, PGA, SOIC, QFP, PLCC [380].

Преимущества лазерного излучения, по сравнению с инфракрасным, заключаются в высокой локализации мощности в зоне нагрева, безинерционности воздействия, что позволяет вести нагрев импульсами малой длительности и точно дозировать энергию излучения; малой зоне термического влияния (0,2–2,0 мм).

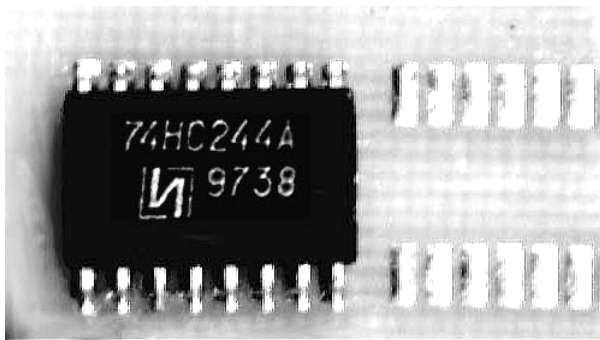


Рис. 10.30. Внешний вид компонентов, смонтированных лазерной пайкой

Оптимизация параметров импульсного лазерного излучения позволяет вести прецизионную скоростную пайку планарных выводов ИМС и многвыводных МаБИС к контактным площадкам печатных плат, безвыводных "чиповых" элементов на платы микромодулей с высоким качеством, автоматизировать процесс, что наиболее полно отвечает требованиям современной технологии поверхностного монтажа [381].

К недостаткам лазерного излучения, как активирующего фактора, следует отнести:

- сложность технологического оборудования;
- нестабильность лазерного излучения во времени;
- особые требования техники безопасности;
- лазерное излучение в большей степени отражается металлом контактной площадки, покрытием выводов радиоэлементов, но в значительной мере поглощается диэлектрической основой печатной платы, вследствие чего может произойти его термическая деструкция;
- большая энергоемкость, малый КПД (около 1 %);
- необходимость точного совмещения плоскости печатной платы с фокальной плоскостью лазера;
- формирование соединений происходит последовательно, что требует наличия устройств перемещения.

Глава 11. ФОРМИРОВАНИЕ СОЕДИНЕНИЙ В ВАКУУМЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОННОГО И ИОННОГО ЛУЧЕЙ

11.1. Взаимодействие электронного и ионного лучей с материалами

Актуальной проблемой современной технологии полупроводниковых приборов является бесфлюсовое лужение и пайка, поскольку остатки флюсов – потенциальные инициаторы коррозии и загрязнений. Кроме того, наличие в припое остатков флюса и пузырей воздуха приводит к локальному перегреву силовых электронных компонентов и выходу их из строя. Ультразвуковые [54] и вакуумные [382] способы позволяют исключить применение флюса, однако имеют ряд существенных недостатков: большие температуры и время процессов, что увеличивает глубину диффузионной зоны; очистка поверхностей припоя и детали не совмещается с операцией лужения или пайки, что приводит к адсорбции загрязнений органического и неорганического происхождения и, как результат, к ухудшению механических, электрических и тепловых характеристик контактных соединений.

Для формирования соединений в вакууме перспективным направлением является использование низкоэнергетичных ионных потоков. Используя невысокий вакуум (10^{-2} Па) и варьируя энергией и плотностью потока ионов, можно совмещать очистку поверхностей с самим процессом пайки и лужения. Процессы протекают в контролируемой атмосфере, что позволяет увеличить их чистоту и воспроизводимость и повысить выход годных приборов.

Энергия ускоренных ионов инертных газов эффективно используется для удаления оксидов и загрязнений с поверхности металла и припоя, для нагрева припоя и детали до температуры пайки, активации соединяемых поверхностей и припоя и увеличения степени растекания припоя. Одним из основных процессов, протекающих при бомбардировке твердых тел ионами, является ионное распыление, т.е. удаление поверхностных атомов твердого тела. Следовательно, это будет способствовать эффективному удалению оксидной пленки и загрязнений. Важной особенностью взаимодействия ионов с твердым телом является то, что более 90% энергии иона переходит в тепловые колебания атомов твердого тела, т.е. расходуется на разогрев обрабатываемого материала.

Процесс распыления часто сопровождается инициированием радиационно–стимулированных химических реакций. Бомбардировка ионами инертных газов может вызвать диссоциацию сложных по составу соединений, изменение химического состава поверхностного слоя, стимулированную диффузию, восстановление материала из окисленного

состояния. Ионная бомбардировка также активирует атомы поверхностного слоя, что стимулирует физико-химическое взаимодействие между припоем и металлом.

Концентрированные потоки ускоренных ионов, фокусируемых в виде луча на поверхность паяемых деталей, позволяют достичь высоких удельных плотностей мощности нагрева, обеспечивают быстроту и локальность нагрева, точность управления тепловой энергией. Воздействуя ионным лучом на поверхность (рис. 11.1), осуществляют очистку от загрязнений и окисной пленки, после совмещения деталей сборку подвергают повторному облучению, расплавляя припой [383]. Использование энергии потоков ускоренных ионов, фокусируемых в виде пучка на поверхности с помощью электростатических и электромагнитных линз в вакууме, позволяет достичь высоких удельных плотностей мощности нагрева, обеспечивает быстроту и локальность нагрева, позволяет точно управлять тепловой энергией. Недостатком такой активации является необходимость вакуума, что ограничивает производительность групповой пайки.

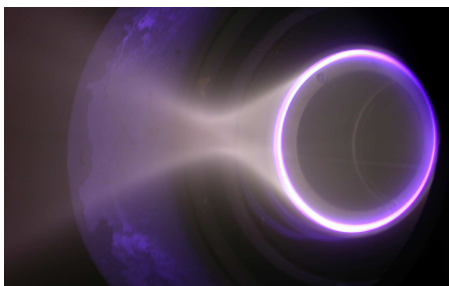


Рис. 11.1. Ионный пучок в вакууме

Взаимодействие пучка ионов с жидким припоем характеризуется физическим явлением, известным под названием «ионный ветер» и которое заключается в передаче импульса (количества движения) ионов расплавленному припою. Под действием этого импульса происходит перемещение верхнего слоя жидкого припоя, что увеличивает степени его растекания на поверхности материала. Ионная бомбардировка также активирует атомы поверхностного слоя, что стимулирует физико-химическое взаимодействие между припоем и материалом.

Для процессов лужения и пайки используют ионные источники типа ускорителя с анодным слоем, который позволяет формировать пучок ионов в виде полого конуса. Такая конфигурация пучка

способствует концентрации энергии разряда на поверхности обрабатываемой детали, что ускоряло процессы очистки и нагрева. Энергия ионов регулируется путем изменения напряжения на аноде и составляет 0,5–2,0 кэВ. Пучок ионов под углом 60 градусов от нормали фокусируется на поверхности детали, причем степень фокусировки можно в небольших пределах изменять величиной магнитного поля соленоида, который находится внутри ионного источника (рис. 11.2). Другой важной особенностью конструкции источника является то, что при пролете через область поперечного магнитного поля разрядной системы ионы отклоняются от продольной оси, т. е. возникают условия, способствующие раскручиванию жидкого припоя относительно центра фокуса. Ионные источники монтируются в вакуумном объеме установок вакуумного напыления типа УРМ 3. 279. 017 (рис. 11.3).

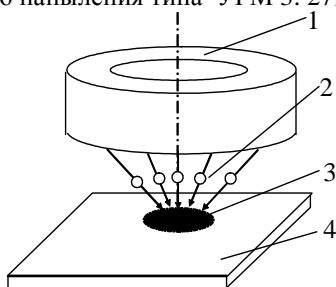


Рис. 11.2. Схема ионно-лучевой пайки: 1 - ионный источник, 2 - пучок ионов, 3 – припой, 4 – деталь



Рис. 11.3. Внешний вид вакуумной установки

Под колпаком вакуумной установки устанавливаются собираемые детали и после создания рабочего вакуума ($5 \cdot 10^{-2}$ Па) начинается

процесс обработки. Общий вид подколпачного устройства ионно-лучевой пайки и лужения вместе с обрабатываемыми деталями представлен на рис. 11.4. В качестве рабочего газа используют аргон высшей очистки. Перед процессами лужения металлические заготовки и навески из припоя обезжириваются в изопропиловом спирте.

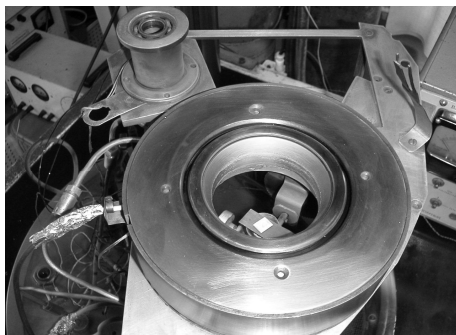


Рис. 11.4. Общий вид устройства ионно-лучевой пайки и лужения

Температуру образцов измеряют проволочной термопарой, а дополнительный нагрев образцов осуществляют резистивным нагревателем. Угол смачивания припоя определяют визуально с помощью установки УКУС–1. Адгезия измеряют методом нормального отрыва с помощью разрывной машины. Коэффициент растекания определяют как отношение площади залуженной поверхности образца к площади поверхности навески припоя.

Особенностями ионно-лучевого лужения алюминиевых сплавов является наличие зоны вторичного растекания припоя и образование эвтектики с припоем. Вторичное растекание обусловлено проникновением жидкого припоя под окисную пленку, причем зона вторичного больше зоны первичного растекания в 1,5–2,0 раза. При перегреве зоны лужения может произойти образование эвтектического сплава алюминия с оловом и свинцом, что приводит к растворению прилегающего к припою объема сплава. В результате возникает обширная зона взаимодействия, которая ухудшает качество лужения. Анализ результатов показывает, что ионно-лучевое лужение обеспечивает в 2,0–2,5 раза большие значения коэффициентов растекания припоя Кр по сравнению с известными методами [384].

Высокое качество облуженных поверхностей как алюминиевых сплавов, так и тугоплавких материалов может быть объяснено

следующим. Прежде всего, при лужении происходит эффективная очистка поверхности металлов и припоя, причем очистка не прерывается и в процессе самого процесса лужения. Следует также отметить, что эффективность очистки достигается за счет того, что окислы и загрязнения удаляются в результате одновременно протекающих процессов - физического распыления, сублимации и испарения за счет нагрева, ионно - стимулированных процессов десорбции, диссоциации и восстановления окислов. Высокая чистота контактирующих материалов способствует интенсивному протеканию процессов растекания и смачивания, что с учетом также воздействия «ионного ветра» обеспечивает высокий коэффициент растекания припоя и низкую величину угла смачивания. Адгезионная прочность сцепления припоя с металлической поверхностью при ионно-лучевом лужении повышается за счет ионной бомбардировки, а также высокой чистоты поверхностей взаимодействующих материалов.

При торможении ускоренных ионов в твердом теле их кинетическая энергия трансформируется в тепловые колебания атомов материала, что является определяющим в процессах лужения и пайки. Вследствие того, что энергию ионов легко изменять в пределах 500–2000 эВ, варьируя ускоряющее напряжение, то также легко можно регулировать и температура деталей.

11.2. Процессы ионно-лучевой пайки и лужения

Кинетика нагрева облуживаемых или паяемых деталей имеет большое значение для обеспечения качественных соединений, т.к. скорость нагрева влияет на процессы взаимодействия между металлом и припоем. Поэтому очень важно знать, как влияют характеристики ионного пучка на скорость нагрева. В качестве объекта для нагрева использовали стальную пластину размером 40x40x1 мм³, на которой закреплялась хромель-алюмелевая термопара. Пластина располагалась в фокусе ионного пучка. Изменялись ускоряющее напряжение на аноде (энергия ионов), ток (количество ионов на пластине), величина магнитного поля (ток соленоида). На рис. 11.5 представлена кинетика нагрева образца в зависимости от напряжения на аноде и тока на мишени-образце. По полученным данным можно сделать следующие выводы: степень расхождения ионного пучка не оказывает существенного влияния на скорость нагрева; ток мишени оказывает большее влияние на скорость нагрева, чем ускоряющее напряжение. Ионной бомбардировкой при данных конструктивных параметрах

ионного источника можно достичь температуры 900–950°C, а с помощью дополнительного резистивного нагревателя – 1000–1200°C.

Исследование процессов очистки осуществлялось с целью определения оптимальных режимов, а именно, энергии ионов, плотности пучка ионов и времени процесса. Эксперименты проводились на образцах из алюминиевого сплава АМц и припоя ПОС 61. Ускоряющее напряжение на аноде изменялось от 0,5 до 2,0 кВ, ток очистки составлял 5–20 мА, т.е. мощность пучка варьировалась в диапазоне от 2,5 до 40 Вт [385].

Эффективность очистки поверхности металла и припоя подтверждена с помощью фотоэмиссионной спектроскопии. Известно, что Al_2O_3 имеет следующие частоты излучения: 512,33; 510,21; 507,93; 489,21; 471,55; 469,46; 302,8 nm^{-1} . Наиболее интенсивным в спектре являлся пик излучения, соответствующий частоте 489,21 nm^{-1} . Поэтому спектрофотометр был настроен на эту частоту, и проведено исследование изменения интенсивности этого пика во времени. Установлено, что интенсивность излучения оксида алюминия резко снижается после 1–2 мин ионной очистки при умеренных режимах: $U_l=1$ кВ, $I_l=10$ мА.

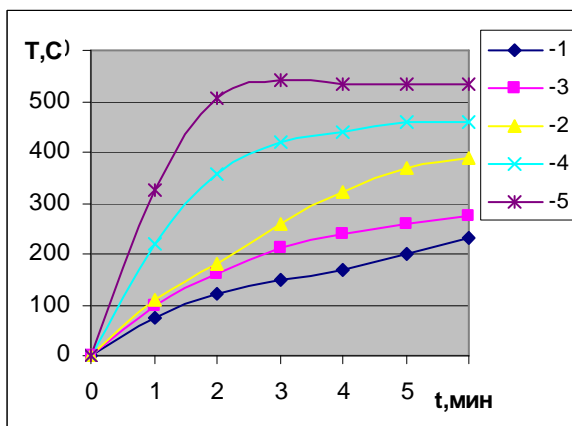


Рис. 11.5. Кинетика ионно-лучевого нагрева при: 1-1 кВ, 10 мА; 2–2 кВ, 10 мА; 3– кВ, 25 мА; 4– 3кВ, 40 мА; 5– 3 кВ, 60 мА

Время ионной обработки также оказывает влияние на качество лужения. Увеличение времени очистки с 5 до 10 мин позволило повысить коэффициент растекания припоя с 3,5 до 5,7 при лужении сплава АМц.

Особенностью ионной очистки металлической поверхности с расположенной на ней навеской из припоя является эволюция формы навески, т.к. под воздействием температуры и сил поверхностного

натяжения происходит образование сферической капли жидкого припоя. Анализ экспериментальных результатов показал, что капля жидкого припоя экранирует часть поверхности металла. Эффект экранирования препятствует раннему началу процесса лужения и приводит к увеличению времени процесса. Поэтому целесообразно осуществлять ионную очистку без навески припоя. Для этого необходимо использовать устройства типа манипулятора–дозатора, с помощью которых возможно помещение навесок припоя на поверхность очищенной детали в условиях вакуума.

Ионно-лучевое лужение сплава АМц припоем ПОС 61 осуществляли при режимах, представленных в табл. 11.1. Увеличение энергии ионов до 1000–1500 эВ и плотности их потока приводит к увеличению коэффициента растекания припоя. При умеренных режимах ионной очистки и лужения была определена кинетика процесса (рис. 11.6).

Таблица 11.1

Режимы ионно-лучевого лужения сплава АМц и параметры растекания припоя

Режимы лужения				K _p		Угол смачивания, град	Адгезия, МПа
Р, Па x10 ⁻²	Ул, кВ	Ил, мА	Время, мин	первичный	вторичный		
7	2,0	40	4,0	6,0	36,4	2	4
6	3,0	40	2,5	5,7	18,1	5	3
8	1,2	20	4,0	3,5	7,4	3	5
6	2,0	40	4,0	4,6	6,7	5	7
6	2,0	40	2,5	7,2	14,2	3	6

Через 0,5–1,0 мин происходит расплавление навески припоя и образование сферической капли. Через 4,5–5,0 мин происходит распыление и десорбция окислов металла в области навески, а так же очистка поверхности самой навески. К этому времени образец нагревается до температуры лужения. При выполнении двух условий, а именно отсутствия окислов и загрязнений в области соприкосновения припоя и металла, а также достаточной температуры происходит быстрое (0,5 с) первичное растекание припоя по поверхности.

Дальнейшая бомбардировка ионами способствует повышению температуры образца, что приводит к затеканию припоя под тонкую (т.к. часть окисной пленки уже стравлена) оксидную пленку и быстрое растекание припоя под ней. Припой растекается до тех пор, пока не

достигнет достаточно толстой пленки оксида. В этой области поток припоя тормозится и растекание по поверхности прекращается.

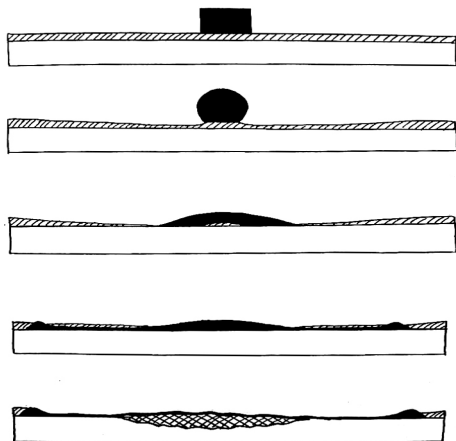


Рис. 11.6. Кинетика ионно-лучевого лужения алюминия и его сплавов

Однако поступающая масса припоя взрывает слой оксида с образованием локальных капель. Таким образом, формируется зона вторичного растекания. Это происходит в течение 0,5-1 мин после начала растекания. Дальнейшая ионная бомбардировка в течение 3-5 мин вызывает перегрев металла, что приводит к созданию условий для формирования легкоплавких эвтектик алюминия с элементами припоя.

Ионно-лучевое лужение тугоплавких металлов проводили припоями ПОИ 50, ПОС61, ПСр2,5и ПСр45 в соответствии с режимами, приведенными в табл. 11.2. Особенностью лужения тугоплавких металлов является отсутствие явлений вторичного растекания и образования эвтектик, что можно объяснить наличием прочной окисной пленки и высокой температурой плавления последних. Характеристики растекания припоя хуже, чем у алюминия, особенно по величине угла смачивания. В то же время адгезия слоя припоя имеет величину, близкую к результатам, полученным при лужении алюминиевых сплавов. При использовании тугоплавких припоев, например ПСр45, можно достичь отличных результатов, так как так же могут создаваться условия для возникновения зоны вторичного растекания.

Ионно-лучевое лужение применено для сборки алюминиевых микрокорпусов интегральных схем [386].

Режимы ионно-лучевого лужения тугоплавких металлов

Металл	Припой	Режимы лужения				K _p	θ, град	Адгезия, МПа
		P·10 ⁻² , Па	U, кВ	I, мА	t, мин			
Mo	ПОИ 50	6	2,0	40	1,0	0,7	18	2,6
Mo	ПОС 61	6	2,5	40	1,5	2,2	10	5,7
W	ПОС 61	7	3,0	50	1,5	1,1	30	2,0
Ta	ПОС 61	6	2,5	40	1,5	2,5	20	4,2
V	ПОС 61	7	3,0	50	1,5	1,9	25	5,7
Ti	ПОС 61	7	3,0	60	1,3	2,1	10	8,5
Ti	ПОС 61	4	1,0	20	1,0	1,2	3	10,0
Ti	ПОС 61	5	2,0	40	1,0	1,3	2	13,5
Ti	ПОС 61	4	3,0	60	1,0	1,1	1	13,8
Mo	ПСр45	7	3,0	60	0,5	3,7	1	16,5
Ti	ПСр2,5	7	3,0	60	0,5	2,6	2	5,6

Процесс включал нанесение фоторезистивной маски, анодное оксидирование основы корпуса, ионную очистку и лужение углубления в корпусе для посадки кристалла (рис. 11.7). Ионная очистка проводилась в течение 3–5 мин при энергии ионов 700 эВ, ионное лужение – в течение 1 мин при энергии ионов 1500 эВ. Для припоев ПОС 61 и ПОИ 50 коэффициент растекания составил 3–7, угол смачивания 1–3 градуса, прочность соединений составила 4–7 МПа.

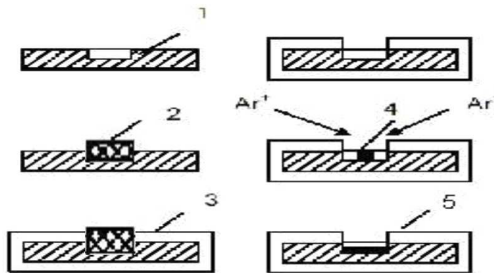


Рис. 11.7. Этапы сборки микрокорпусов: 1– основание с углублением, 2– нанесение фоторезистивной маски, 3– анодное оксидирование, 4– нанесение заготовки припоя и ионная очистка, 5– ионное лужение

Достоинством данного процесса являются: отсутствие флюса и высокое качество лужения. Процессы ионно-лучевого лужения

тугоплавких металлов характеризуются более широким диапазоном параметров ионного пучка во время лужения, что позволяет получать воспроизводимые результаты.

11.3. Процессы электронно-лучевой пайки соединений

В качестве теплового источника используют электронные пучки низких энергий, полученных из газового разряда высоковольтного типа [89]. Такой разряд позволяет формировать электронные пучки с сечением практически любой формы и геометрических размеров, необходимых для обработки полупроводниковых приборов, что значительно упрощает как процесс нагрева изделия, так и конструкцию теплового источника. Отмеченные возможности высоковольтного разряда можно использовать при производстве силовых полупроводниковых приборов большой мощности, в которых диаметр полупроводниковых кристаллов достигает 80-100 мм.

Образцы для эксперимента изготовлены из пластин монокристаллического кремния КЭФ-32 толщиной 300мкм, ориентированных в плоскости $|111|$. Методом диффузии на них были сформированы тиристорные структуры, контакты к которым изготавливались по стандартным методикам. На ультразвуковом станке УПС-4772 пластины разрезаны на круги диаметром 6мм, промыты и высушены. Подготовленные таким образом образцы поступили на операцию пайки, которая осуществляется следующим образом. В кассету последовательно закладывали полупроводниковый кристалл 1, припойную прокладку 2, выполненную из сплава ПСИН-25 с температурой растекания 270°C и смоченную 10%-ным раствором хлористого цинка, и вольфрамовый термокомпенсатор 3, покрытый электролитическим золотом. Исследования показали, что упомянутая выше стандартная кассета, выполненная из монолитного куска углерода 4, не пригодна для данной операции, поскольку при резком нагреве пары флюса, и легкоиспаряющихся примесей, содержащихся в припое, создают давление между кристаллом и термокомпенсатором, способное выбросить последний из гнезда кассеты. Чтобы исключить это явление, предложена конструкция кассеты (рис. 11.8), предусматривающую возможность истечения паров флюса из торцевой поверхности промежутка кристалл – термокомпенсатор, что резко уменьшает давление. Взаимодействуя с электронным лучом, пары ионизируются и возникшие ионы начинают перемещаться под действием электрического поля в область анода и катода газоразрядной пушки, тем

самым значительно уменьшая вероятность загрязнения полупроводникового кристалла. Для предотвращения его загрязнения остатками флюса, адсорбированными пористым углеродом, на дно кассеты закладывается кольцо 5, которое может быть выполнено из кварцевого стекла, керамики или рубина. Кассеты устанавливаются для нагрева на подложке электронно – лучевой установки, выполненной на базе УВН-70А-1. В подколпачное устройство этой установки входит кассета, представляющая собой кольцо, и подложкодержатель в виде диска из алюминия. Электронная пушка формирует до четырех электронных пучков в виде отрезка дуги радиусом 220, длиной 70 и шириной 7 мм, что обеспечивает нагрев тиристора до температуры 500°С; а подложкодержатель вращается со скоростью 4 мм/с.

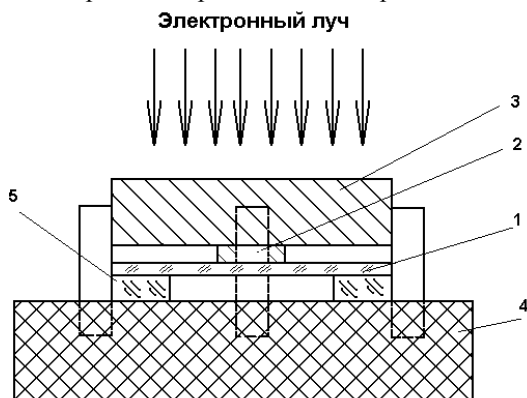


Рис. 11.8. Схема электронно-лучевой пайки полупроводниковых приборов

Оптимальные электрические параметры электронного луча, необходимые для процесса пайки, выбирают исходя из равномерного нагрева поверхности прибора и минимального термического влияния на структуру кристалла. Это позволяет получить прочные паяные соединения, в которых отсутствовали непропаи, пустоты, затекания припоя на поверхность кристалла и термокомпенсатора. Контроль температуры полупроводникового кристалла в процессе электронно-лучевого нагрева осуществляется термопарой, расположенной у поверхности тиристора. Наибольший процент выхода годных приборов достигнут при $U=2,5-2,7$ кВ и температуре 300°С. При $U<2,5$ кВ не удается нагреть зону расплава до температуры, которая обеспечивала

бы удаление сторонних газов из зоны расплава и молекул газа, адсорбируемых пористым золотым покрытием термокомпенсатора. В результате этого в паяном шве появляются газовые каверны и неоднородности по глубине фронта сплавления со стороны термокомпенсатора. Газовые каверны резко уменьшают отвод тепла от полупроводникового кристалла, приводящего к перегреву р-п перехода при пропускании через него сильного тока, а неоднородность фронта плавления приводит к неравномерному распределению электрического поля в приборе, влекущее за собой нестабильность параметров тиристора. Бездефектный, но тонкий пластический слой припоя образуется при $U > 2,7$ кВ за счет перегрева, приводящего к его активному испарению вплоть до полного исчезновения.

После пайки соединения проходили операцию отмывки и сушки. Облуживались контактные площадки тиристорного кристалла также с использованием электронного луча. Контроль готовых приборов показал, что оптимальным значением ускоряющего напряжения при облуживании контактных площадок тиристора является $U = 2,6$ кВ, т.к. в этом случае достигается температура 300°C , позволяющая получить необходимое качество приборов. Припайвание тиристорного элемента к основанию корпуса и электрических выводов к электродам тиристора проводилось одновременно: в отверстие вкладыша помещаются электроды, на который укладывается тиристорный элемент, а затем основание корпуса облуживалось припоем ПОС 61 при 280°C . Полученные структуры в камере электронно-лучевой пушки проходили контроль по электрическим параметрам. Максимальный процент выхода годных структур достигнут при $U = 3,4$ кВ и $T_{\text{кр}} = 300^{\circ}\text{C}$. Смещение ускоряющих напряжений в сторону больших значений объясняется значительным теплоотводом и теплоемкостью массивного основания корпуса.

Таким образом, применение электронно-лучевого нагрева в производстве полупроводниковых приборов на операциях пайки позволяет увеличить воспроизводимость характеристик паяного шва, повысить процент выхода годных приборов и производительность труда.

Глава 12. ПАЙКА СОЕДИНЕНИЙ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

12.1 Монтаж кристаллов полупроводниковых приборов на эвтектику

Эксплуатационная надежность мощных транзисторов определяется, главным образом, их теплоэлектрическим состоянием, которое формируется на стадии присоединения кристалла к корпусу. При этом возможно образование скрытых дефектов (пустоты, микротрещины, сколы), которые приводят к образованию участков под кристаллом с аномально высоким тепловым сопротивлением. Если площадь дефектов невелика по сравнению с площадью кристалла и не затрагивает активной структуры транзистора, то основная часть изделий имеет низкий уровень теплового сопротивления. Однако, в процессе длительной эксплуатации в условиях экстремальных термоциклических воздействий такие изделия могут оказаться потенциально-ненадежными из-за развития микротрещин до активной структуры. Уровень остаточных термических напряжений во многом зависит от качества присоединения кристаллов на припой [387].

Методы монтажа кристаллов на выводные рамки: пайкой эвтектическими сплавами или легкоплавкими припоями, приклеиванием, посадкой на токопроводящую композицию должны обеспечить высокую прочность соединений при термоциклировании и механических нагрузках, низкое электрическое и тепловое сопротивление, минимальное механическое воздействие на кристалл и отсутствие загрязнений.

Если кристаллы приборов имеют значительную мощность рассеяния (более 0,5 Вт), то между подложкой кристалла и посадочной площадкой выводной рамки необходимо создать токопроводящий электрический контакт с незначительным электрическим и тепловым сопротивлением, что достигается использованием методов пайки. Для тех приборов, в которых мощность рассеяния кристалла невелика, а электрическое сопротивление между подложкой кристалла и рамкой незначительно влияет на работу прибора, то кристалл приклеивают на токопроводящую композицию [388].

Посадка кристалла на эвтектические сплавы помимо технологических трудностей (высокие температуры, золотое покрытие) имеет и другие недостатки. В виду малой пластичности эвтектики Au–Si и разницы в коэффициентах термического расширения кристалла и рамки в напаянном кристалле возникают значительные механические

напряжения, что приводит к сколам кристаллов при пайке, последующих технологических операциях и механических испытаниях, а также к снижению надежности приборов.

Тепловую модель мощного транзистора с напаянным кристаллом на кристаллодержатель можно представить в виде трех многослойных параллелепипедов, которые имитируют кристалл с плоским источником тепла на его поверхности, слой припоя заданной толщины и участок кристаллодержателя, ограниченного размерами паяного соединения (рис.12.1). Тепловое сопротивление напаянного кристалла, исходя из упрощенной тепловой модели [389], можно определить из выражения:

$$R_{thjc} = \sum_{i=1}^3 Ri = \frac{1}{\lambda_{Si}} \int_0^{L_{kp}} \left(\frac{dL}{b+LtgB} - \frac{dL}{a+LtgB} \right) + \frac{L_{hp}}{\lambda_{np} \cdot S_{np}} + \frac{1}{\lambda_{Cu}(a-b)} \ln \frac{b+2L}{a+2L} \cdot \frac{a}{b} \quad (12.1)$$

где $\lambda_{Si}, \lambda_{np}, \lambda_{Cu}$ – теплопроводности кристалла, припоя, кристаллодержателя; L_{Si}, L_{np}, L_{Cu} – толщина кристалла, припоя, кристаллодержателя; a и b – размеры источника тепла; tgB – тангенс угла растекания теплового потока.

При толщине паяного соединения, равной 50 мкм, расчетное значение R_{thjc} составляет $0,545^\circ\text{C}/\text{Вт}$ и при этом выполняется необходимое условие $R_t \text{ расч} < R_{thjc}$. На зарубежных образцах изделий фирм Siemens, International Rectifier реальная толщина припоя под кристаллом составляет 45–60 мкм.

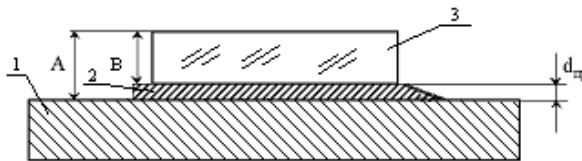


Рис.12.1. Схема монтажа кристалла:
1 – кристаллодержатель, 2 – припой, 3 – кристалл

При выборе нижнего предела учитывают, что существует критическая величина паяного соединения, ниже которой резко снижается надежность изделий в экстремальных условиях эксплуатации из-за возникновения внутренних механических напряжений, превышающих допустимый уровень для данной конструкции прибора. Согласно [394] для ИМС и полупроводниковых приборов с площадью кристалла более 25 мм минимальная толщина

соединения "кристалл-корпус" должна быть не менее 25 мкм. Максимальное напряжение, возникающее при охлаждении кристалла, определяется выражением:

$$\sigma_{\max} = K(\alpha_1 - \alpha_2)(T - T_0)\sqrt{\frac{E_1 E_2 L}{X}}, \quad (12.2)$$

где σ_{\max} – максимальное напряжение; α_1, α_2 – коэффициенты линейного термического расширения припоя и кремния; E_1, E_2 – модули упругости припоя и кремния; T, T_0 – температуры пайки и окружающей среды; K – безразмерная константа.

Внутренние напряжения в напаянном кристалле могут достигать 50–65 МПа и при воздействии термоциклических нагрузок привести к образованию трещин в кристалле. Так как при уменьшении толщины припоя внутренние напряжения возрастают, то для обеспечения надежности изделий необходимо выбирать толщину припоя в пределах 25 – 50 мкм.

В производстве полупроводниковых приборов в пластмассовых корпусах типа ТО-92 используются рамки выводные, содержащие локальную полосу серебра. Так фирмы Siemens (Германия), Motorola (США), LGS (Корея) и другие используют рамки выводные из медного сплава с серебряным покрытием толщиной 2 – 5 мкм.

Присоединение кристаллов к таким рамкам выводным осуществляется методом контактно-реактивной пайки с образованием эвтектики. Однако при этом следует иметь в виду, что образование эвтектики Ag – Si возможно только при высоких температурах, порядка 830 – 850°C, которые неприемлемы для сборки. Поэтому для снижения температуры образования соединения «кристалл – рамка» обычно на неплоскую поверхность кристаллов наносят системы металлизации: Ge – Au, Ti – Ge – Au, V – Au, Au – Ag. В этих системах общим является наличие слоя золота толщиной более 1 мкм, а так как адгезия золота к кремнию недостаточная, то перед напылением в вакууме слоя золота сначала осаждают пленку титана.

Использование системы металлизации Ti–Ge–Au, позволяет осуществлять эвтектическую пайку кристаллов на рамку выводную со слоем серебра с образованием эвтектики сложного состава Au – Ge – Si – Ag. Но в условиях массового производства отмечается невоспроизводимость качества монтажа кристаллов в результате чего отмечаются сверхнормативные потери из-за: снижения выхода годных по электрическим параметрам $R_{\text{си}}$, $I_{\text{с.ост.}}$, $U_{\text{си пред.}}$; сбоев в работе установок напайки и присоединение выводов в результате отслаивания кристаллов от рамки.

В этой связи проведены исследования по выбору оптимального способа монтажа кристаллов, обеспечивающего требуемый уровень электрических параметров, а также воспроизводимый уровень качества продукции с достижением выхода годных по сборке не менее 92 % [391]. Исследование процесса эвтектической пайки кристаллов проводилось для двух систем металлизации: Ti–Ge–Au и V–u.

После формирования MOSFET-транзисторных структур типа BSS295 обратная сторона пластин подвергалась утонению методом фрезерования от 460 до 340 мкм. Затем после отмывок и обработки в однопроцентном растворе HF проводилось напыление на установке «Оратория 9» указанных систем металлизации. Напыление подслоя Ti – V осуществлялось электронно-лучевым методом, напыление золота толщиной 0,6–1,5 мкм выполнялось термическим испарением с использованием резистивного испарителя.

Режимы напыления подслоя Ti–V: вакуум $(5-8) \cdot 10^{-4}$ Па, температура 320 ± 20 °С, время 40 с. Золото распылялось термическим испарением из двух испарителей в два этапа: I – температура 280°С, время напыления 10 с; II – температура 150°С, время напыления 12 с.

После разбраковки по электрическим параметрам и внешнему виду пластины разделялись на кристаллы дисковой резкой на полуавтомате ЭМ – 225. Напайка кристаллов выполнялась на автомате ЭМ– 105 в следующих технологических режимах: температура $T = 400 - 500$ °С, время пайки $t_n = 400$ ед., амплитуда колебаний инструмента $A_{x,y} = 1-2$ ед, количество периодов колебаний $N_{x,y} = 1- 10$ ед, статическая нагрузка на инструмент $P = 70$ г. После напайки кристаллов на рамку выводную проводился контроль качества как визуальным осмотром, так и путем воздействия нормированной нагрузки на срез до разрушения кристалла.

Установлено, что основными причинами, приводящими к снижению выхода годных изделий, являются:

- отслаивание кристаллов из-за неполного образования эвтектики по всей площади;

- образование микротрещин и растрескивание кристаллов после пайки и термокомпрессионной разварки выводов.

На рис. 12.2 приведена зависимость количества отслаиваний кристаллов от толщины слоя золота на кристалле. Анализ причин отслаивания кристаллов показал, что образование эвтектики произошло только в мелких локальных зонах и при малых толщинах (менее 1,0 мкм) золота не хватает для участия в эвтектике тройного состава. Это обусловлено тем, что на первой стадии взаимодействия должна образоваться фаза Au–Si, которая уже на второй стадии будет

участвовать в образовании Au–Si–Ag. Однако образование фазы Au–Si на первой стадии может быть затруднено из-за присутствия барьера в виде толстого слоя Ti, а также из-за присутствия тонкой оксидной пленки SiO₂ перед напылением металлов.

Очевидно, существенное влияние остаточного оксида, не полностью удаленного перед напылением, на отслаивание кристаллов. При толщине остаточного оксида более 50 Å и температурах пайки 400–500°C взаимодействие Ti с Si не происходит и кремний не проникает в золото в необходимом количестве. Поэтому площадь образования эвтектики под кристаллом мала и происходит отслаивание кристалла. Реакция между Ti и Si в этом случае может происходить только при T = 900°C с образованием TiSi₂.

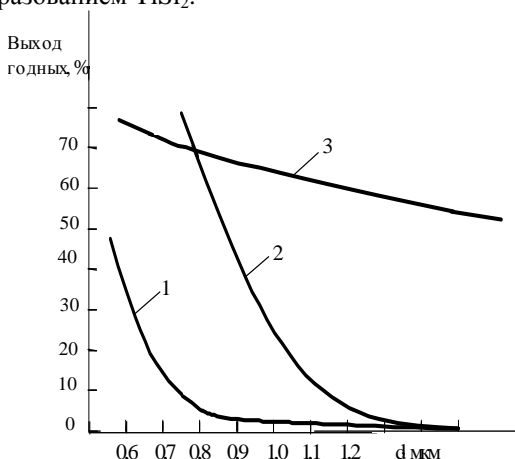


Рис. 12.2. Влияние толщины золота на кристалле на количество отслаиваний после пайки: 1 – V–Au, 2 – Ti–Ge–Au, 3 – Ti–Ge–Au с уменьшенным временем обработки в HF

В случае малой толщины остаточного оксида < 50 Å при температуре напайки уже происходит образование TiSi₂ и в результате межзеренной диффузии атомы Si проникают в глубь золота с образованием сначала эвтектики AuSi, а затем эвтектики тройного состава AuSiAg. Также следует иметь в виду, что Ti, являясь эффективным геттером, захватывает атомы кислорода из атмосферы в подколпачном устройстве установки напыления с образованием оксида: Ti + Si → TiO₂.

Это также затрудняет проникновение атомов Si в слой Au, и процесс напайки кристаллов резко ухудшается. Поэтому для повышения воспроизводимости качества напайки кристаллов целесообразно использовать систему V–Au. Использование металлизации V – Au позволяет уменьшить количество брака по отслаиванию кристаллов от рамки после напайки. После сборки приборов по всему технологическому маршруту проведены измерения электрических параметров (табл. 12.1).

Таблица 12.1

Результаты измерений электрических параметров

№ варианта	Тип металлизации	Выход годных, %	Виды брака, %
I	V – Au	89,8	R _{ост} – 2,5 I _{с ост} – 7,0 Обр. – 0,7
II	Ti – Ge – Au	86,6	R _{ост} – 4,5 % I _{с ост} – 8,0 % Обр. – 0,9 %
III	Ti – Ge – Au с t _{тр} < N в HF	49,2	R _{ост} – 28 % I _{с ост} – 2,8 % Обр. – 20 %

Анализ бракованных приборов выявил образование трещин и расслоений кристаллов. Причем если для варианта с уменьшенным временем обработки в HF брак по R_{си} обусловлены некачественной напайкой, то есть образование эвтектики не по всей площади кристалла и составляет 90%, а 10 % обусловлены наличием трещин в кристаллах.

Таким образом, повышение качества напайки, которое отмечается для варианта V – Au, способствует снижению брака по R_{си} с 28% до 2,5%, но отмечается увеличение брака по I_{с ост} с 2,8 % до 7–8%. Установлено, что повышение сплошности эвтектики под кристаллом приводит к росту количества приборов с трещинами в кристаллах. Это связано с тем, что трещины в напаянных кристаллах происходят по причине возникновения внутренних механических напряжений в ТКЛР используемых материалов: Si – 4,2·10⁻⁶ 1/°C, Cu –18,6·10⁻⁶ 1/°C, Au–Si – 14·10⁻⁶ 1/°C.

Внутренние механические напряжения в кристаллах после напайки определяются параметрами материалов, размерами кристалла, а также температурой пайки изделий:

$$\sigma = E(\alpha_1 - \alpha_2)(T_{нан} - T_{комн})F(h_1/h_2), \quad (12.3)$$

где E – модуль упругости кремния; α_1, α_2 – ТКЛР кремния и рамки выводной; $T_{нап}$, $T_{комн}$ – температура напайки и комнатная температура; F – функция, зависящая от соотношения (h_1/h_2) ; h_1 – толщина кристалла; h_2 – толщина рамки.

С целью выявления режимов напайки на растрескивание кристаллов были изготовлены приборы с различными режимами. После напайки при $T=430$ С и $T=480^\circ\text{C}$ при параметрах вибрации 1–40 периодов колебаний при $A_{x,y} = 1$ ед выполнялась разварка $Au = 30$ мкм при $T = 300$ °С, $t_{св} = 45$ мс, $P_{кр} = 40$ г, $P_{тр} = 90$ г, приборы проходили полный технологический маршрут изготовления и контроль, результаты которого представлены в табл. 12.2.

Влияние режимов напайки на выход годных по электрических параметрам представлено на рис. 12.3. Увеличение количества колебаний инструмента в процессе напайки кристаллов приводит к уменьшению брака по параметрам $R_{си}$ и $I_{с\text{ост}}$, и к снижению количества приборов с микротрещинами и растрескиванием кристаллов.

Таблица 12.2

Результаты контроля готовых приборов

Количество периодов колебаний инструмента	Температур, °С	Выход годных, %	Виды брака		
			$R_{си}$	$I_{с\text{ост}}$	Обр.
1	2	6	7	8	9
1	430	78,9	25,0	3,0	0,9
1	480	65,0	21,0	11,0	3,0
1	2	6	7	8	9
10	430	84,9	10,2	3,8	1,1
10	480	75,2	15,5	9,0	0,3
20	430	85,5	9,0	5,0	0,5
20	480	84,0	9,5	6,0	0,5
30	430	87,0	6,5	6,0	0,5
30	480	85,6	6,9	5,1	2,4
40	430	87,0	6,0	5,5	1,5
40	480	83,2	5,9	9,0	2,3

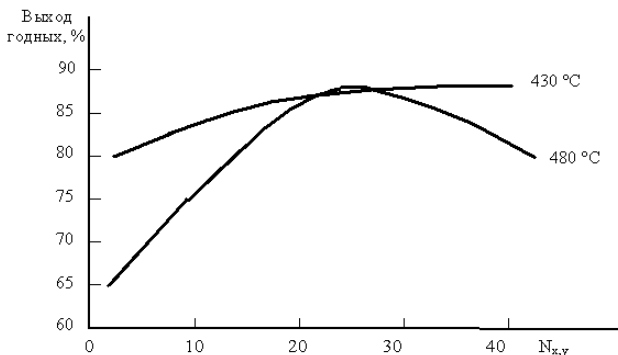


Рис. 12.3. Зависимость процента выхода годных приборов от количества колебаний инструмента ($N_{x,y}$)

На рис. 12.4 условно показано расположение зоны напайки кристаллов по длине нагревательного столика и температурный профиль процесса.

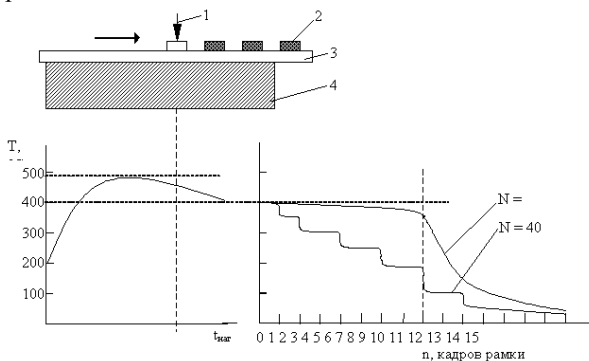


Рис. 12.4. Условное изображение расположения зоны напайки кристаллов по длине нагревательного столика (а) и температурный профиль процесса: 1 – монтаж кристалла, 2 – напаянный кристалл, 3 – рамка выводная, 4 – столик

Длина нагревательного столика составляет 10 см, а зона, где проводится пайка кристаллов, расположена на расстоянии четырех кадров рамки выводной от края столика. Это значит, что во время напайки пятого кристалла, первый напаяемый кристалл уже вышел за пределы нагретого столика. Время присоединения кристалла при $N=1$ ед. составляет 50 мс, а при $N=40$ колебаний инструмента – 2000 мс.

По мере выхода рамки выводной из зоны нагревателя происходит снижение температуры кристалла, так как рамка выводная отдает тепло окружающей среде. При этом для варианта $N = 1$ ед. ($t = 50$ мс) значительное снижение температуры кристалла наступает, когда 30 % рамки выводной выйдет за пределы нагревателя. В этом случае градиент снижения температуры составляет свыше $100^\circ\text{C}/\text{с}$.

Для варианта $N = 40$ ед. ($t = 2000$ мс) снижение температуры происходит равномерно по мере выхода кадра из зоны нагревателя. Чем дальше кадр рамки от нагревателя, тем быстрее происходит охлаждение кристалла. При этом градиент температуры составляет всего $15\text{--}20^\circ\text{C}/\text{с}$. По мере выхода рамки выводной из зоны нагревателя происходит снижение температуры поверхности рамки, которая отдает тепло окружающей среде.

Таким образом, высокая скорость пайки выполняется при значительных градиентах температур, что приводит к своеобразному термоудару, в результате которого, и возникают термомеханические напряжения в кристаллах, способствующие образованию микротрещин и растрескиванию кристаллов. Поэтому при эвтектической пайке кристаллов для снижения брака по $R_{\text{сн}}$ необходимо:

- обеспечить подготовку непланарной поверхности перед вакуумным осаждением $V - Au$ (обработка в HF для удаления остаточного оксида SiO_2);
- при формировании металлизации получить толщину Au $1,3 - 1,5$ мкм;
- обеспечить плавное охлаждение кристаллов после напайки.

Однако из-за большого различия в ТКЛР используемых материалов возникающие термомеханические напряжения приводят к образованию микротрещин в кристаллах, и в итоге – к росту уровня $I_{\text{ост}}$. Поэтому для монтажа кристаллов большой площади (до $3,9 \text{ мм}^2$), что значительно больше площади кристаллов, используемых в серийном производстве ($0,25 \text{ мм}^2$), целесообразен монтаж кристаллов на припой и на электропроводящий клей.

12.2. Автоматизированный монтаж кристаллов вибрационной пайкой

Монтаж кристаллов с приложением вибраций амплитудой $0,5 - 1,0$ мкм в плоскости основания позволяет обеспечить равномерное растекание припоя и до минимума свести дефекты в паяном соединении в виде пустот [392]. В крупносерийном производстве для

присоединения кристаллов к корпусам полупроводниковых приборов широкой номенклатуры вибрационной пайкой эффективен автомат ЭМ-4085-14М фирмы ПЛАНАР (Беларусь) (рис. 12.5), в состав которого входят микропроцессорный контроллер, оптико-телевизионная система распознавания кристаллов, линейный шаговый двигатель перемещения кристаллов, двухкоординатный стол сварочной головки, магазинный механизм автоматической подачи корпусов [393]. Производительность автомата для пайки кристаллов размером от 1×1 до 5×5 мм составляет 2000, для посадки на клей - 3500 и на стеклоприпой – 600 кристаллов в час.

Автоматизированный процесс монтажа кристаллов на припой на автомате модели ЭМ-4085-14М обладает рядом особенностей, позволяющих осуществлять монтаж на выводные рамки из медного сплава, покрытые никелем. Нагреватель в автомате туннельного типа содержит 12 зон контролируемого и регулируемого нагрева до 450⁰ С, блок формирования защитно–восстановительной атмосферы смешивает поступающие газы Н₂ и N₂ в смесь 10:90 (формир–газ) для активирующего воздействия на процесс монтажа кристаллов. Нанесение дозы расплавленного припоя в зону монтажа кристалла осуществляется автоматически проволочным дозатором, при этом программируется не только скорость вращения центрального распределительного вала, но также скорость движения вакуумного захвата и скорость съема кристаллов.

Исследовался процесс монтажа кристаллов высоковольтных мощных транзисторов типа КТ872 (Uкб=1500 В) размером 5,0x5,0x0,34 мм, содержащими на непланарной стороне систему металлизации Ti-Ni-Ag. Присоединение кристаллов на рамку из медного сплава Cu-Sn-0,15, покрытую слоем никеля толщиной 3–6 мкм, осуществлялось на припой Sn-Ag-Sn на автомате ЭМ4085-14М, где обеспечивалось активное движение кристалла в процессе пайки по программируемой траектории [394].

В качестве припоя использовался проволочный припой Ø1.0,07 мм марки ПСрОСу, намотанный на пластмассовую катушку, закрепленную в дозаторе. Подача припоя в зону лужения осуществлялась линейным шаговым двигателем, на который поступают управляющие импульсы, количество которых предварительно программируется.

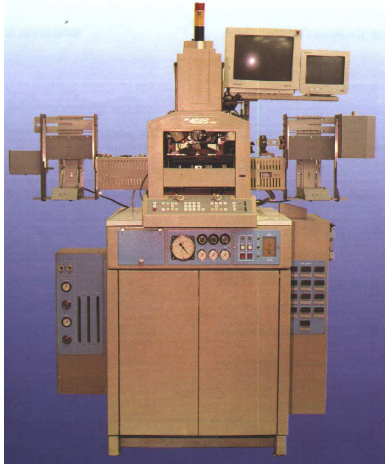


Рис. 12.5. Автомат присоединения кристаллов ЭМ-4085-14М

Определены условия эффективного отрыва капли припоя в зоне лужения кристаллодержателя. Оптимальный диапазон температур дозирования составил $370\text{--}390^{\circ}\text{C}$. При расчете дозы припоя учитывалось, что минимальная толщина припоя под кристаллом должна быть на уровне $25\text{--}30\text{ мкм}$. В процессе вибрационной пайки часть припоя выдавливается за пределы кристалла, что составляет порядка 30% от полезного объема припоя, тогда общий объем припоя при дозировке должен быть примерно равен:

$$V_{\Sigma} = V_k + V_n = 0,975 \text{ мм}^3. \quad (12.4)$$

где V_k – объем капли припоя; V_n – потери припоя.

При подаче одиночного импульса на дозатор двигатель перемещает проволоку припоя в активную зону на расстояние K , равное, примерно 8 мкм, поэтому доза припоя, задаваемая количеством импульсов, составляет:

$$D = \boxed{} = 155,2 \text{ имп}, \quad (12.5)$$

где L – расстояние, на которое необходимо переместить проволоку припоя:

$$L = \boxed{} = 1,242 \text{ мм}, \quad (12.6)$$

где V_{Σ} - объем припоя, $S_{пр}$ - сечение проволоки припоя.

Для исследования выбран диапазон дозирования припоя в пределах 120–225 имп., а температура монтажа кристаллов – на 20–30⁰ С выше температуры дозирования капель припоя, $T_m = 380 + 30 = 410^0$ С.

В процессе присоединения кристаллов параметры вибрации: амплитуда и траектория принудительного движения кристаллов программировались. После пайки проводился контроль толщины паяного соединения индикатором часового типа. Измерялись толщины кристалла (размер В) и общая толщина кристалла и припоя (размер А), после чего определялась толщина паяного соединения $d_{пп} = A - B$.

Исследованы факторы, определяющие температуру нагрева кристалла и величину остаточных термических напряжений в диапазоне температур пайки:

- толщина паяного соединения;
- сплошность припоя под кристаллом (наличие пустот, непропаев);
- образование зоны локальной деформации на непланарной стороне кристалла, вызванной воздействием металлической иглы механизма съема кристаллов с адгезионного носителя [395].

Результаты контроля толщины паяного соединения для разных параметров вибрации представлены на рис.12.6. Контроль выхода годных приборов после изготовления контрольных партий при использовании различных режимов вибрации в процессе напайки кристаллов показал, что при малой дозе припоя (100 имп) выход годных составляет 93,5–95,0%. При этом малая амплитуда колебаний кристалла в пределах 250 мкм не позволяет получить сплошной паяный шов под кристаллом. При дозах припоя более 150 имп., выход годных находился в пределах 96,3–97,8%, припой, растекаясь за пределы кристалла, (на величину заданной амплитуды колебаний) эффективно заполняет все пространство под кристаллом, вытекал со всех сторон кристалла. Паяный шов образуется без пор, пустот и щелей.

Для обеспечения толщины паяного соединения кристалл—кристаллодержатель не менее 30 мкм необходимо не только увеличивать дозу припоя более 150 имп., но и уменьшать амплитуду колебаний кристалла в процессе монтажа.

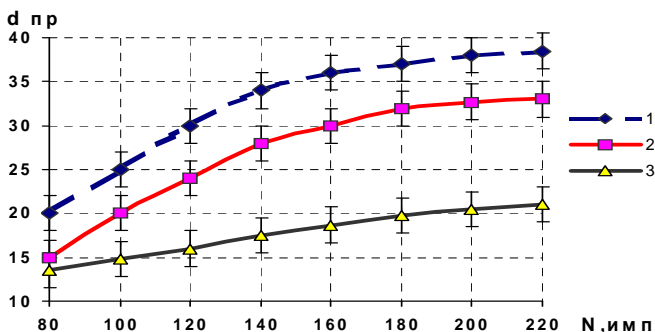


Рис.12. 6. Зависимость толщины припоя под кристаллом от дозы припоя ($N_{имп}$) при различной амплитуде колебаний: 1 – 250 мкм, 2 – 500 мкм, 3 - 750 мкм

Однако применение малых амплитуд вибраций имеет и отрицательное влияние. Так, при амплитуде менее 250 мкм качество паяного соединения ухудшается из-за образований локальных несмоченных припоем участков, располагаемых вблизи центральной части кристалла. При этом площадь непропаев может достигать 25–30% площади активной транзисторной структуры. Образующиеся неоднородности способствуют развитию тепловой неустойчивости однородного токораспределения, искажению теплового фронта и, за счет этого перегреву кристалла. В результате этого отмечается снижение процента выхода годных до 88,2–93,5%. Увеличение параметров вибрации по координатам x , y и амплитуды вибраций более 750 мкм приводит к эффективному растеканию припоя за пределами активной структуры. Толщина под кристаллом слабо зависит от дозы и не превышает уровня 15–22 мкм. При таких высоких уровнях вибрации припой под кристаллом имеет однородную структуру, благодаря этому обеспечивается равномерное распространение теплового потока, что способствует росту выхода годных до 95,9–97,6%

При монтаже кристаллов с амплитудой вибраций 500 мкм образуется не только бездефектное паяное соединение как при $A_{xy}=750$

мкм, но достигается заданная толщина припоя в пределах 30÷35 мкм. Качественное присоединение кристаллов позволяет получить выход годных по электрическим параметрам на уровне 95,5–97,8% [396].

Определены требования к величине силы удержания кристалла $F_{уд}$ на адгезионном носителе, оптимальная величина которой составляет 0,05 Н. Использование адгезионного носителя с $F_{уд} >> 0,05$ Н для кристаллов площадью 25 мм² требует более тщательной настройки работы механизма съема кристаллов. При этом с целью компенсации крутящего момента, приводящего к развороту кристалла или его сбрасыванию с вакуумной присоски, необходимо корректировать в сторону увеличения угла опережения движения иглы подкола. Это приводит к росту динамического воздействия иглы на кристалл и увеличения площади дефектов [397].

Для оценки эффективности выбранных технологических режимов автоматизированного монтажа кристаллов были проведены сравнительные испытания изготовленных приборов путем воздействия термоударов при $T = -196 \div +200$ °С, $n=100$ циклов с замером электропараметров $J_{кЭК}$, $U_{кЭ НАС.}$, $U_{БЭ НАС.}$, $R_{ТЛК}$, через каждые десять термоударов. Увеличение параметров вибрации A_{xy} в процессе монтажа кристаллов (рис. 12.7) приводит к снижению толщины припоя под кристаллом и снижению надежности приборов при термошоковых испытаниях из-за развития термомеханических напряжений в системе кристалл–припой–кристаллодержатель, приводящих к возникновению трещин в кристалле.

Внешний вид припоя под кристаллом после вибрационной пайки и травления приведен на рис. 12.8,а, а для пассивного процесса монтажа, при котором кристалл находится в состоянии статического равновесия под действием силы собственного веса (вариант напайки кристалла в конвейерной водородной печи) на рис. 12.8,б. Для пассивного монтажа характерно образование локальных пустот и непропаев под кристаллом, которые, являясь концентраторами, способствуют росту напряжений более чем в 2 раза после термоциклического воздействия. Это приводит также к ухудшению воспроизводимости по температуре перегрева кристалла, увеличивая ΔT_j до $(40-90)^0$ С и снижая выход годных до 90–95 %. Для варианта автоматизированного процесса присоединения кристаллов выход годных составил 97,2–98,6%, а $\Delta T_j = (40-55)^0$ С.

Автоматизированный монтаж кристаллов вибрационной пайкой приводит к гомогенизации паяного соединения, исключению дефектов в виде пустот и непропаев в результате чего снижается уровень термомеханических напряжений активной структуры, снижается

переходное тепловое сопротивление и повышается его воспроизводимость.

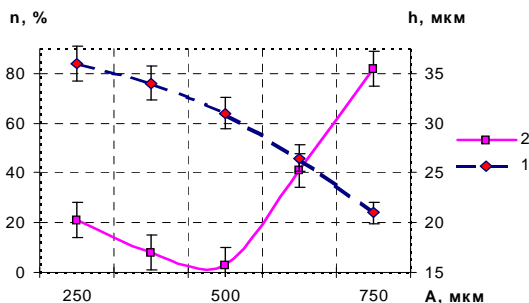
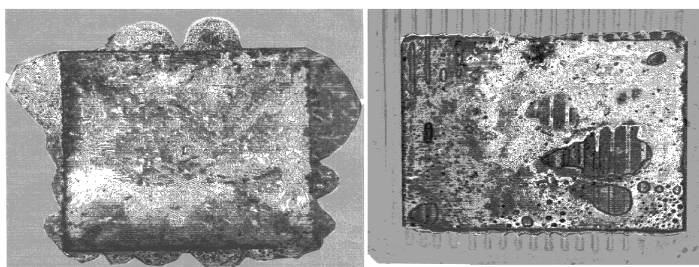


Рис. 12.7. Зависимости количества отказов и толщины припоя в соединении от амплитуды вибраций: 1 – толщина припоя, 2 – количество отказов после термоударов



а

б

Рис. 12.8. Внешний вид припоя под кристаллом (кристалл удален травлением): а – напайка на ЭМ4085-14М; б – напайка в печи ЖК4007

При амплитуде колебаний кристалла 250–500 мкм по криволинейной замкнутой траектории происходит наиболее эффективное удаление окисных пленок и шлаков за пределы активной зоны, обеспечивая равномерную толщину припоя в соединении. Автомат ЭМ4085-14М позволяет осуществлять автоматизированный монтаж на припое кристаллов площадью 25 мм² вибрационной пайкой с высоким качеством соединений и изготавливать высоковольтные мощные транзисторы с выходом годных по электрическим параметрам до 98%. Для обеспечения высокой устойчивости к термоциклическим нагрузками при T= -196÷+200°С необходимо тщательно выбирать параметры вибрационной пайки и дозу припоя.

12.3. Монтаж кристаллов транзисторов в корпусе D-PAK и IGBT

При сборке транзисторов в пластмассовом корпусе для поверхностного монтажа с повышенной мощностью рассеивания (discrete power device package) (D-Pak) применяют посадку кристалла с помощью припойной прокладки. Для обеспечения заданной мощности $P_{\max} \leq 45\text{Вт}$ и низкого переходного теплового сопротивления р-п переход–корпус в качестве кристаллодержателя и теплоотвода применяют медные сплавы с теплопроводностью не хуже $350 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$ [398]. Однако использование в составе корпуса транзистора материалов, не совместимых по величине коэффициента теплового линейного расширения (КТЛР), приводит к необходимости ограничения тепловых воздействий в процессе монтажа, что и отражается в технических условиях на изделия. Различные технологии пайки поверхностного монтажа: волновая, ИК нагревом, в паровой фазе связаны с интенсивным нагревом тонкого пластмассового корпуса. При высоких тепловых нагрузках возникает опасность растрескивания корпуса и кристалла, возможность проникновения влаги внутрь корпуса и деградации характеристик транзистора [399].

Корпуса транзисторов для поверхностного монтажа (D-Pak) относятся к XIV группе по ГОСТ 20.39.405-84, и к ним предъявляются жесткие требования по воздействию режимов пайки и паяемости выводов:

1. Конструкция изделий должна обеспечивать трехкратное воздействие групповой пайки и лужения выводов горячим способом без теплоотвода при температуре пайки не выше 265°C в течение 4 с.

2. Изделия должны выдерживать групповую пайку одноразовым погружением корпуса в расплавленный припой (волну припоя) при температуре до 265°C в течение до 4 с.

3. Выводы и контактные площадки изделий должны иметь гарантированную паяемость с использованием спиртоканифольных неактивированных и некоррозионных слабоактивированных флюсов.

Методы монтажа кристаллов на выводные рамки: пайкой эвтектическими сплавами или легкоплавкими припоями, приклеиванием, посадкой на токопроводящую композицию должны обеспечить высокую прочность соединений при термоциклировании и механических нагрузках, низкое электрическое и тепловое

сопротивление, минимальное механическое воздействие на кристалл и отсутствие загрязнений.

Если кристаллы приборов имеют значительную мощность рассеяния (более 0,5 Вт), то между подложкой кристалла и посадочной площадкой выводной рамки необходимо создать токопроводящий электрический контакт с незначительным электрическим и тепловым сопротивлением, что достигается использованием методов пайки. Для тех приборов, в которых мощность рассеяния кристалла невелика, а электрическое сопротивление между подложкой кристалла и рамкой незначительно влияет на работу прибора, то кристалл приклеивают на токопроводящую композицию [400].

Посадка кристалла на эвтектические сплавы (помимо технологических трудностей (высокие температуры, золотое покрытие) имеет и другие недостатки. Ввиду малой пластичности эвтектики Au–Si и разницы в коэффициентах термического расширения кристалла и рамки в напаянном кристалле возникают значительные механические напряжения, что приводит к сколам кристаллов при пайке, последующих технологических операциях и механических испытаниях, а также к снижению надежности приборов [401].

Внутренние напряжения, возникающие в процессе присоединения кристалла к подложке, определяются не только физическими параметрами соединяемых материалов, температурой процесса, но также и соотношением толщины кристалла к толщине подложки. Расчет напряжений сжатия на поверхности кристалла по формуле 12.3 показал, что при монтаже кремниевых кристаллов на основания из медного сплава, возникают внутренние напряжения, которые могут превышать допустимый уровень напряжения изгиба кремния (250 МПа), в результате чего возникают микротрещины в кристалле. Выбор оптимальной толщины кристалла в пределах 200–250 мкм при $h_1/h_2=0,4-0,5$ позволяет уменьшить возникающие деформации (рис.12.9).

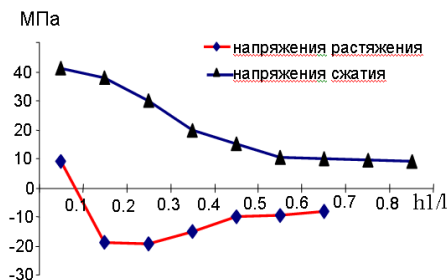


Рис. 12.9. Механические напряжения в кристалле

Для установления влияния различия КТЛР кремниевого кристалла и кристаллодержателя из медного сплава БрХ исследовались транзисторные структуры размером 2,7x2,7x0,3 мм с напыленной на непланарную сторону системой металлизации Ti-Ni-Sn-PbSn-Sn. Оптимальное соотношение компонентов системы металлизации и припой выбрано с учетом температуры присоединения внутренних проволочных соединений методом термовзвучковой сваркой золотой проволокой при 250°C. Этому условию в соответствии с диаграммой состояния Pb-Sn отвечает композиция, содержащая 85% свинца. Трехслойная композиция Sn-SnPb-Sn выбрана, как наиболее эффективная система, обеспечивающая смачивание припоём поверхности никеля на непланарной стороне кристалла и серебра на кристаллодержателе. Толщина слоя олова составляет 2 мкм со стороны никеля и 1 мкм на наружной поверхности. Расчетное значение толщины свинца:

$$h_2 = \frac{A \cdot \gamma_1 \cdot h_1}{(100 - A) \cdot \gamma_2}, \quad (12.7)$$

где h_1, h_2 — толщина слоя Sn и Pb соответственно; γ_1, γ_2 — уд. вес Sn и Pb соответственно; A — требуемое содержание Pb в припоём.

Уменьшение толщины слоя Sn до 2 мкм приводит к снижению толщины слоя Pb до 7,2 мкм, таким образом, варьирование толщиной слоев Sn в пределах 2–3 мкм и Pb в пределах 7,2–10,8 мкм позволяет получить припойную композицию с температурой плавления 250–270° С. С учетом допуска ± 0,5 мкм толщина Sn составила: 1 слой–1,5 мкм, 2 слой–0,5 мкм, толщина слоя Pb 7,2–10,8 мкм, а общая толщина припоя 9,2–13,8 мкм.

Исследовано влияние конструктивных и технологических факторов (толщина паяного соединения кристалл- кристаллодержатель; наличие демпфера между кристаллом и пластмассовой частью корпуса в виде

эластичного компаунда; режимы зачистки облоя на теплоотводящей поверхности кристаллодержателя) на устойчивость транзисторов с $P_{\max} = 30$ Вт в корпусе D-Пак к значительным температурным ударам, возникающих в процессе поверхностного монтажа [402].

Металлизация Ti-Ni осаждалась в установке 01НИ-7-015 непрерывного действия с магнетронной системой распыления. Использованы мишени из никеля марки Н-0 по ГОСТ 849-70, титана ВТ1-0 толщиной листа 6–10 мм по ГОСТ 22178-78. Режимы напыления: давление в камере не более $6,7 \cdot 10^{-5}$ Па; ток нагрева 3,5 А; мощность магнетрона напыления титана 2 кВт; напыления никеля 3 кВт; скорость конвейера 100 мм/мин.

После формирования металлизации Ti-Ni осаждалась припойная композиция Sn-PbSn-Sn в установке электронно-лучевого испарения в вакууме «Оратория-9» при следующих режимах: температура напыления 280°C; напряжение 6 кВ; ток эмиссии 0,5 А; время напыления Sn₁ – 120–240 с; PbSn – 400–600 с; Sn₂ – 120–40 с. Изготовленные таким образом транзисторные структуры, после соответствующего контроля по электрическим параметрам и внешнему виду, поступали на сборку. Для сборки транзисторов применялась выводная рамка из материала БрХ с полосой серебра толщиной 7 ± 1 мкм. Монтаж транзисторных структур на легкоплавкую припойную композицию выполнялся на автомате ЭМ4085-03 при следующих технологических режимах: температура 300–400°C; амплитуда колебаний кристалла 25–200 мкм; количество периодов колебаний 2–10.

Качество монтажа кристаллов определялось по внешнему виду до и после воздействия разрушающей нагрузки, прикладываемой перпендикулярно боковой поверхности кристалла. При этом пайка считалась удовлетворительной, если разрушение происходило по кремнию и не менее чем 80% площади кристалла занято кремнием. Это требование подтверждалось и результатами контроля переходного теплового сопротивления «р-п переход-корпус» ($R_{\text{ТПК}}$), выполненного с использованием зондового устройства.

Активация процесса монтажа кристаллов за счет принудительного вибрационного воздействия при амплитудах 25–50 мкм не оказывает положительного результата. Это вызвано тем, что при малых амплитудах вибрации, в условиях выполнения процесса монтажа без применения защитной атмосферы, не происходит полного удаления окислов из зоны монтажа и образуются участки с непроямами, приводящими к росту теплового сопротивления. Это особенно заметно в случае пайки кристаллов при температурах до 300° (рис. 12.10).

Увеличение температуры монтажа кристаллов до 390°C, а амплитуды колебаний до 75–150 мкм способствует эффективному удалению окислов из зоны монтажа, при этом исключаются пустоты и непропаи под кристаллом, что и позволяет получить требуемый уровень переходного теплового сопротивления. Это имеет существенное значение для мощных транзисторов.

Монтаж кристаллов на легкоплавкий припой вибрационной пайкой на автомате ЭМ–4085 приводит к гомогенизации паяного соединения, исключению дефектов в виде пустот и непропаев. В результате снижаются уровень термомеханических напряжений в активной структуре, переходное тепловое сопротивление и повышается производительность монтажа.

При сборке транзисторов опробован вариант с увеличенной толщиной паяного соединения за счет использования дополнительной прокладки припоя ПОС 10 толщиной 50 мкм [403]. Нанесение эластичного демпфирующего слоя компаунда СИЭЛ 159-322Б на поверхность кристалла после формирования проволочных перемычек, выполнялось на автомате ЭМ–4085 с применением стандартного дозатора. После выполнения каждой технологической операции проводился контроль кристаллов по внешнему виду на наличие трещин.

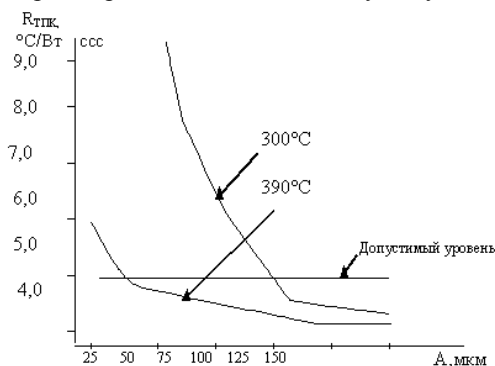


Рис. 12.10. Влияние режимов монтажа кристаллов на уровень теплового сопротивления

После герметизации на рамках осуществлялось удаление перемычек микрофрезой и освобождение эмиттерного и базового выводов от связующей кромки рамки, с последующим контролем ВАХ каждого прибора и после каждой операции. В результате последовательного операционного анализа установлено, что трещины в кристалле

возникают в процессе герметизации. Анализ характерного расположения трещин на кристалле (рис. 12.11) указывает на то, что растрескивание кристаллов происходит при герметизации в процессе смыкания прессформы на отдельных гнездах матрицы из-за несоответствия величины перепада на формованной части рамки и матрицы прессформы. При глубине формовки коллекторного вывода $1 \pm 0,07$ мм на рамке фактическое несоответствие глубины перепада на элементах матрицы прессформы достигает $\Delta_{\max} = 0,25$ мм. Это приводит к тому, что в процессе смыкания верхней и нижней частей прессформы происходит деформация плоскости кристаллодержателя и пластическая деформация зоны пайки кристалла с последующим образованием трещины в кристалле.

Трещины в кристалле отсутствовали для вариантов сборки транзисторов с защитой кристалла эластичным демпфирующим слоем и с дополнительным демпфирующим слоем припоя. В этих вариантах в результате уменьшения глубины перепада на элементах прессформы происходит снижение внутренних напряжений в кристалле и устраняются трещины в нем.

При герметизации корпуса пластмассой на теплоотводе образуется облой повышенной толщины, достигающей 40–50 мкм. Это создает значительные трудности по его удалению шлифовальным кругом на плоскошлифовальном станке и может являться причиной возникновения дополнительных механических напряжений в кристалле.

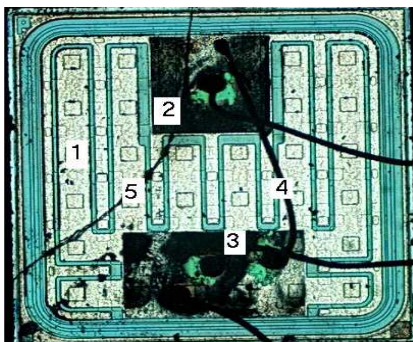


Рис. 12.11. Внешний вид кристалла: 1- кристалл, 2,3 – контактные площадки, 4 – проволочное соединение, 5 –трещина

В процессе зачистки облоя необходимо исключать возможность грубого заглабления шлифовального круга в материал выводной рамки. В этом случае происходит перегрев кристаллодержателя, что заметно по изменению его цвета, а механическая деформация поверхностного слоя, передаваемая в кристалл, приводит к возникновению механических напряжений, способных привести к его растрескиванию. Неоднократные эксперименты при различных режимах зачистки облоя шлифовальным кругом показали высокую эффективность применения дополнительного защитного эластичного компаунда, наносимого на поверхность кристалла.

В результате совершенствования конструктивно-технологического исполнения приборов и доработки пресс-форм были изготовлены контрольные партии приборов с последующим испытанием в условиях поверхностного монтажа на плату: полное погружение в припой при температуре $260 \pm 5^\circ\text{C}$ в течение 10 с. Гистограмма распределения приборов с различным конструктивно-технологическим исполнением по отказам в условиях поверхностного монтажа приведена на рис. 12.12. Для оптимального варианта конструктивно-технологического исполнения приборов брак не более 2 %.

Таким образом, оптимальный вариант конструктивно-технологического исполнения мощных транзисторов в корпусе D-Pak, предназначенных для поверхностного монтажа (толщина паяного соединения не менее 8 мкм, посадка кристалла на легкоплавкий припой вибрационной пайкой, защита кристалла эластичным компаундом, глубина формовки в пределах не хуже $\pm 0,07\text{мм}$), обладает высокой надежностью в условиях температурных воздействий процессов групповой пайки.

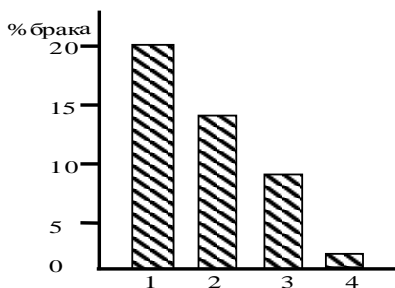


Рис. 12.12. Гистограмма распределения приборов по отказам: 1 – малая толщина паяного соединения ($\leq 5\text{мкм}$), 2 - несоответствие глубины формовки $0,25\text{мм}$, 3 - защита компаундом отсутствует, 4 - оптимальный вариант

В современных условиях наиболее качественное преобразование электроэнергии при максимальной компактности и надежности устройств обеспечивается электронными модулями на базе управляемых силовых полупроводниковых приборов с изолированным затвором (IGBT — Insulated Gate Bipolar Transistor) с высокой степенью интеграции. Повышенный интерес к IGBT объясняется чрезвычайно малой мощностью управления и высоким быстродействием, что позволяет создавать на их основе компактные силовые устройства с частотой переключения до нескольких десятков килогерц.

Для IGBT применяют новые корпуса - Super-220 и Super-D2Pak, которые имеют такую же топологию и расстояние между выводами, что и стандартные, но содержат кристаллы значительно больших размеров. Super-220 имеет топологию TO-220, но в нем размеры кристалла увеличены почти вдвое, что обеспечивает ток до 95 А, что на 20 А больше. Корпус допускает поверхностный монтаж и крепление зажимами. Super-D2Pak имеет топологию D2Pak, но содержит кристалл на 40% больше и допускает ток до 95 А. Мощные IGBT в металлокерамическом корпусе работают в режиме коммутации больших токов, поэтому наиболее распространенной причиной их катастрофического отказа является вторичный пробой вследствие локальных участков структуры с аномально высокой температурой и повышенного теплового сопротивления «р-п переход-корпус» за счет дефектов в припое под кристаллом.

С целью повышения эксплуатационной надежности приборов оптимизирован процесс их сборки [404]. Кристаллы IGBT изготавливались с двумя типами металлизации – Ti-Ni-V-Ag и V-Au на непланарной стороне. Нанесение металлизации Ti-Ni-Ag осуществлялось магнетронным способом на установке «Магна 2М», металлизации V-Au – на установке «Оратория 9» УВНЗЭ.Э60, подслоя V– электронно-лучевым методом, золота–термическим испарением с использованием резистивного испарителя. Монтаж кристаллов на автомате ЭМ-4085 повысил эффективность образования эвтектики Au-Si за счет активации процесса присоединения в результате принудительного движения кристаллов по криволинейной замкнутой траектории, обеспечиваемой программируемыми параметрами вибрации. При амплитуде колебаний кристалла 250 мкм за 8–10 периодов колебаний происходит эффективное удаление окисных пленок и шлаков за пределы активной зоны, обеспечивая равномерную толщину эвтектики в соединении при температуре 450–460°С и усилении

нагрузки – 1,45 Н. При этом отмечается, что монтаж кристаллов на эвтектику Au-Si и на припой при оптимальных температурах обеспечивает равномерное растекание эвтектики (припоя) по всему периметру кристалла без пор и непропаев.

Исследованиями на рентгенотелевизионном микроскопе установлено, что пассивный монтаж кристаллов на припой в конвейерной печи характеризуется наличием дефектов в виде непропаев и пустот в припое до 10–25% от площади кристалла, а для варианта монтажа на эвтектику дефектность не превышает 5%. В процессе коммутации на индуктивную нагрузку наибольшие изменения теплового сопротивления выявлены для варианта монтажа на припой. В процессе испытаний имеется температурный градиент вследствие распространения тепла от кристалла к подложке, поэтому даже при равенстве ТКЛР (температурный коэффициент линейного расширения) кристалла и подложки наблюдается разность деформаций, вызывающей достаточно большие растягивающие усилия в паяном соединении и приводящей к его разрушению. В случае монтажа кристаллов на эвтектику приборы выдерживают испытания без усталостного разрушения паяного соединения, в результате чего тепловое сопротивление почти не изменяется. Таким образом, для обеспечения устойчивости мощных IGBT транзисторов к циклическому воздействию электрической мощности необходимо осуществлять монтаж кристаллов на эвтектику Au-Si при оптимальной температуре.

12.4. Бессвинцовые припойные композиции для монтажа кристаллов

Для сборки мощных полупроводниковых приборов в корпусах ТО-92, ТО-126 используют припойные композиции, которые послойно наносят на непланарную поверхность кристаллов. Основным недостатком припойной композиции: $\text{Sn}_{2\pm 0,5} - \text{Pb}_{8\pm 1} - \text{Sn}_{1\pm 0,5}$ является наличие свинца, обладающим высокой токсичностью ($\text{ПДК}=0,01\text{мг/м}^3$). Для монтажа кристаллов в корпус такие фирмы, как International Rectifier, Motorola, Esac и др. [405, 406] широко применяют бессвинцовые припои: олово-серебро и олово-серебро-медь. Проволочный припой $\text{Sn}_{65} - \text{Ag}_{25} - \text{Sb}_{10}$ и двухкомпонентный эвтектический состав $\text{BiAg}_{2,6}$ с температурой плавления 262°C пригодны для монтажа кристаллов и последующей разварки золотых проволочных выводов термозвуковой сваркой [407, 408]. Однако эти припои характеризуются повышенным значением

теплового сопротивления и для мощных приборов их использование целесообразно.

Бессвинцовые паяльные композиции не смачивают поверхность так же хорошо, как припой Sn63/Pb37, который растекается тонким и широким слоем. Исследования показали, что, припои Sn63/Pb37 имеют растекаемость 93%, у бессвинцовых этот параметр варьируется от 73 до 77% [409].

Применение бессвинцовых припоев приводит к изменению сборочных процессов и технологии пайки. Необходима корректировка режимов пайки, а также комплексные испытания бессвинцовых паяных соединений на прочность, тепловое сопротивление, коррозионную стойкость и др. [410]. При решении вопроса о надежности паяных соединений, наряду с выбором оптимальных способов и режимов пайки, необходимо учитывать состав и свойства припоев, которые должны:

- обеспечивать хорошую паяемость с полупроводниковыми кристаллами и свариваемость с внутренними проволочными выводами;
- сохранять способность к пайке и сварке при заданном сроке хранения; обеспечивать антикоррозионную защиту;
- не подвергаться иглообразованию при хранении и разрушению при температурах сборки, испытания и эксплуатации.
- обеспечивать минимальное переходное электрическое сопротивление;
- быть устойчивыми к тепловому удару при монтаже приборов на печатные платы пайкой, к химическим реагентам, используемым в процессе сборки.

Основными конструктивно-технологическими особенностями приборов в пластмассовых корпусах типа КТ-26 (ТО-92), КТ-27 (ТО-126), КТ-89, КТ-92 (D-Pak, I-Pak) являются следующее:

1. Применение кристаллов, содержащих на непланарной поверхности слой золота толщиной 1,75 мкм (для кристаллов с малым размером – не более 0,5x0,5мм, приборы в корпусе КТ-26).

2. Применение рамок выводных из лент медного сплава для КТ-26 (латунь Л-68), для КТ-89, КТ-92 (бронза БрХ), меди для КТ-27 (МЗР) и многослойной плакированной ленты МЖМ, на поверхности которых в зоне монтажа кристаллов и разварки выводов содержится слой серебра, толщиной 3–5 мкм для гальванического покрытия и 5–7 мкм для холодного плакирования.

3. Выполнение монтажа кристаллов:

- методом контактно-реактивной пайки с образованием трехфазной эвтектики Au-Si-Ag, при температурах порядка 440-460°С (для

кристаллов с малым размером – не более 0,5x0,5мм, приборы в корпусе КТ-26);

– методом пайки на припой, который образуется в процессе плавления припойной композиции $\text{Sn}_{2\pm 0,5} - \text{Pb}_{8\pm 1} - \text{Sn}_{1\pm 0,5}$, наносимой на обратную сторону кристаллов.

Основные требования к системам металлизации непланарной поверхности пластин заключаются в следующем:

1. Высокая электропроводность проводящих элементов металлизации.

2. Низкая величина удельного переходного сопротивления невыпрямляющего контакта.

3. Высокая адгезия к полупроводнику и другим контактирующим слоям.

4. Согласованность ТКЛР полупроводника и других контактирующих слоев.

5. Возможность образовывать эвтектическое присоединение кристалла с материалом покрытия корпуса.

6. Высокая технологичность процесса формирования металлизации.

7. Возможность автоматизации производства монтажа кристалла в корпус.

Перед напылением системы металлизации пластины проходят ряд операций по механическому утонению методом шлифовки связанным абразивом непланарной поверхности с толщины 420 мкм до 270 ± 20 мкм. После утонения кремниевые пластины подвергаются процессам отмывки и последующей химической обработки в растворе HF. Затем на непланарную поверхность пластин методом вакуумной конденсации послойно наносится металлизация $\text{V}_{0,05}-\text{Au}_{1,75}$. (рис.12,3а) или Ti-NiV-Ag-Sn-Pb-Sn (рис. 12.13,а). В качестве основы корпусов используются рамки выводные, полученные из ленточного плакированного материала, содержащим полосу серебра (рис. 12.14). В основе рамки выводной содержится медь или медный сплав, что крайне важно при изготовлении приборов с рассеиваемой мощностью более 0,5 Вт. Но такие материалы имеют высокий уровень коэффициента термического линейного расширения (КТЛР) в пределах $(18-20)10^{-6}1/^\circ\text{C}$.

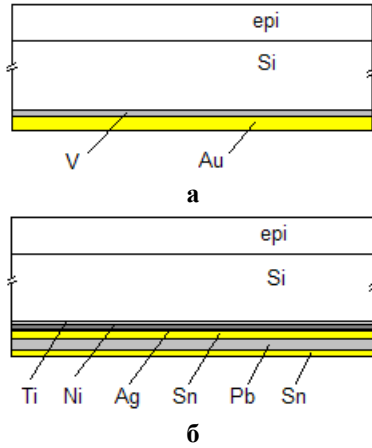


Рис.12.13. Структура металлизации на непланарной поверхности кристаллов с золотом (а) и с припойной композицией (б)

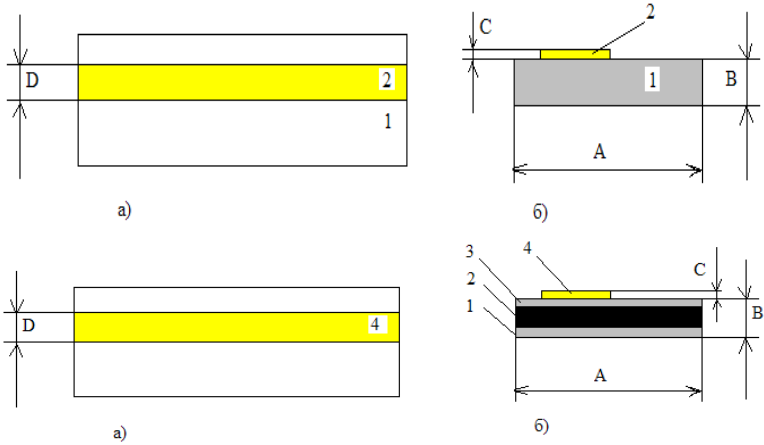


Рис. 12.14. Ленточный плакированный материал, содержащий полосу серебра (для корпусов КТ-26, КТ-89, КТ-92–а) (а) вид сверху; (б) поперечное сечение: 1– основа –медный сплав; 2– полоса серебра; (для корпуса КТ-27 (а) вид сверху; (б) поперечное сечение: 1– медь; – основа – сталь 08КП; 3– медь; 4– полоса серебра

Поэтому рассогласование по КТЛР приводит к значительным механическим напряжениям в активной структуре полупроводникового прибора, уровень которых может превысить предел прочности кремния.

Термомеханические напряжения в кристалле, возникающее после его монтажа в корпус, могут достигать 180–240 МПа и определяются выражением [411]:

$$\sigma_{\max} = k(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot (T_{II} - T_0) \sqrt{\frac{E_1 \cdot E_2 \cdot L}{d}}, \quad (12.8)$$

где σ_{\max} – максимальное напряжение, α_1 , α_2 – коэффициент линейного расширения кристаллодержателя и кремния, T_{II} – температура пайки, T_0 – температура окружающей среды, L – линейный размер кристалла, k – безразмерная константа, d – толщина паяного соединения.

Как следует из выражения (12.8) для снижения внутренних напряжений в активной структуре, напаянной на медную рамку, требуется увеличивать толщину паяного соединения под кристаллом. Таким образом, при использовании рамки выводной из медного сплава требуется конструкция кристалла, которая должна содержать на непланарной поверхности демпферный слой припойной композиции для предотвращения неконтролируемого роста внутренних напряжений в напаянном кристалле и исключения его растрескивания.

Для сборки полупроводниковых приборов используют бинарную систему Sn-Ag в качестве припоя для монтажа кристаллов. Сравнивая бинарную Sn-Ag с тройной системой Sn-Ag-Cu (или Sn-Ag-Sb) предпочтение отдано первой, как наиболее простой и дешевой (для систем Sn-Ag-Cu или Sn-Ag-Sb потребовалась специальная мишень).

При расчете толщины припойной композиции необходимо исходить из условия обеспечения устойчивости приборов к температурному воздействию при испытаниях на теплоустойчивость при 260°C. Как видно из диаграммы фазового состояния системы Sn-Ag (рис. 12.15), при содержании серебра по массе 3% образуется эвтектический сплав с температурой плавления 221°C. Для получения сплава с температурой ликвидуса более 260°C, например, 300°C потребуется вводить серебро в количестве 20 мас. %.

Для припойной композиции, наносимой путем распыления в вакууме на установке «Оратория-9», необходимо определить ее толщину исходя из заданной системы металлизации, размера кристалла и режимов вибрационной пайки. Для приборов в пластмассовых корпусах типа КТ-26, КТ-27 с размером кристаллов до 2,5x2,5 мм² толщина паяного соединения под кристаллом рекомендуется в пределах 7–8 мкм.

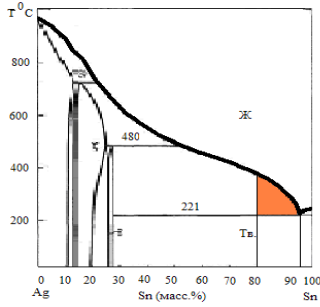


Рис. 12.15. Диаграмма фазового состояния системы Sn-Ag

В процессе вибрационной пайки с заданием амплитуды колебаний кристаллу по осям X, Y в пределах 150– 200 мкм расходует до 25% припоя на смачивание поверхности серебряного покрытия на рамке выводной, поэтому общая толщина припойной композиции составляет 10 ± 2 мкм. Исходя из этого, определим толщину слоя серебра при заданном содержании олова 10 ± 2 мкм, т.е. 8 мкм, 10 мкм и 12 мкм:

$$h_{Ag} = \frac{A \cdot \gamma_{Sn}}{(1 - A) \cdot \gamma_{Ag}} \cdot h_{Sn} \quad (12.9)$$

где h_{Ag} , h_{Sn} — толщина слоя Ag и Sn соответственно; γ_{Ag} , γ_{Sn} — уд. вес Ag и Sn соответственно; A — требуемое содержание Ag в припое.

На рис. 12.16 приведена расчетная зависимость толщины слоя серебра для заданного содержания олова в припойной композиции, обеспечивающей температуру плавления в интервале 221–350°C.

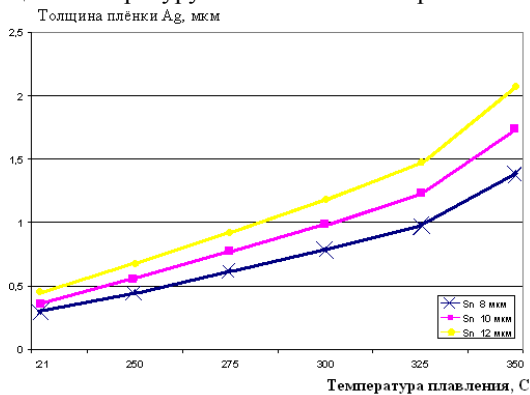


Рис. 12.16. Зависимость толщины серебра для заданного содержания олова в припойной композиции Sn-Ag от температуры ликвидуса

Для достижения температуры ликвидуса 300°C при толщине олова 10 ± 2 мкм и с учетом минимальной толщины паяного соединения 7,0 мкм содержание серебра должно быть не менее 1,0 мкм.

Для оптимизации свойств припойной композиции изготовлены пластины полупроводниковых приборов КТ816, КТ315 с металлизацией Ti-Ni и напылением слоев олова и серебра в различном соотношении. Электронно-лучевое нанесение олова толщиной 8–12 мкм на установке «Оратория-9» длилось 5,0 – 5,5 ч. Магнетронное напыление серебра выполнялось на установке «Магна-2М», где варьирование толщины серебра от 0,2 до 1,5 мкм достигалось изменением мощности магнетрона.

Исследованиями на Оже-спектрометре установлена неравномерность распределения элементов припойных композиций Ag_{1,5} – Sn₉ – Ag_{1,5} и Ag_{1,5} – Sn₉ (рис. 12.17) по глубине до 12 мкм от поверхности. Так, содержание олова в зависимости от глубины слоя изменяется от 75 до 52%, что приводит к нарушению стехиометрического состава композиции, неконтролируемому изменению температуры ее плавления, и в итоге, к невозпроизводимости процесса сборки.

При контроле внешнего вида пластин КТ816 (1–6 вар) обнаружено, что с увеличением толщины серебра от 0,2 до 1,5 мкм наблюдалось укрупнение кристаллической структуры по направлению от базового среза и выше (рис. 12.18, а, б). Это указывает на то, что температура по площади пластины неравномерная – возле базового среза температура меньше и растет с удалением от базового среза. Из-за перегрева пластины на противоположной области от базового среза происходит оплавление припойной композиции, а поверхность композиции становится рельефной и бугристой (рис. 12.18, в).

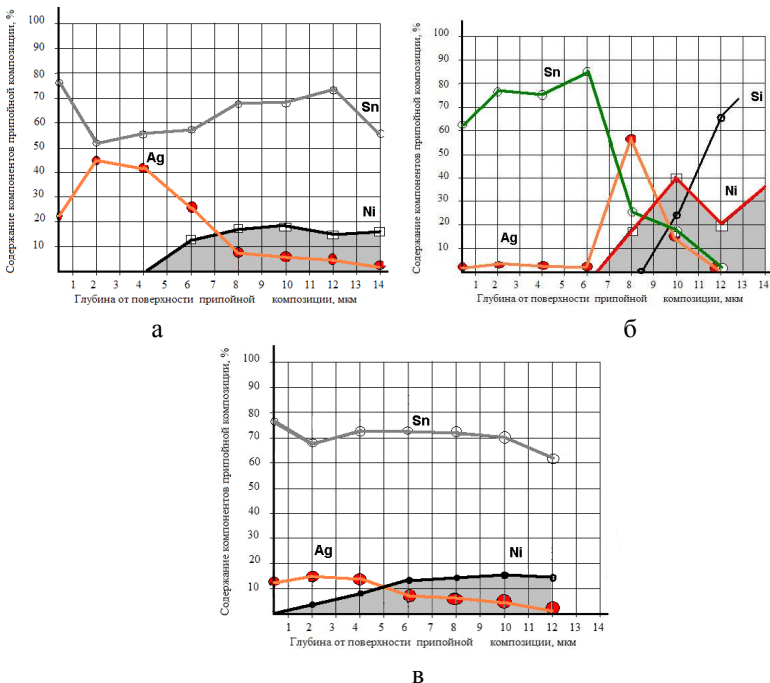


Рис. 12.17. Распределение содержания компонентов по глубине композиции Ag_{1,5} – Sn₉ – Ag_{1,5}(а), Ag_{1,5} – Sn₉ (б), Ag_{0,2} – Sn₉ – Ag_{0,2} (в)

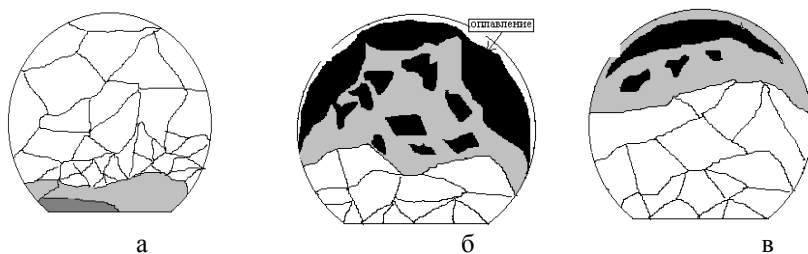


Рис. 12.18. Структура верхнего слоя припойной композиции: Ag_{0,2} – Sn₉ – Ag_{0,2} (а), Ag_{1,5} – Sn₁₂ – Ag_{1,5} (б), Ag_{1,5} – Sn₉ – Ag_{1,5} (в)

Для вариантов с верхним слоем, состоящим только из олова, структуры кристаллитов не выявлены, поверхность композиции была однородной.

Напайка кристаллов КТ816 на выводную рамку, содержащую полосу серебра толщиной 4–6 мкм, проводилась на автомате ЭМ 4085 вибрационной пайки при температуре 330°C и давлении 80 г, количестве колебаний в секунду – 4, а КТ315 – на автомате ЭМ– 4105 при 360°C. Качество напайки кристаллов для всех вариантов соответствовало требованиям процесса – равномерное растекание припоя по всему периметру, щели и непропаи отсутствовали. Прочность сцепления кристаллов с рамкой соответствовала техническим требованиям, при воздействии нагрузки на кристалл отслаивания его не происходило.

Разварка межсоединений выполнена на автомате ЭМ–4060Т2 золотой проволокой диаметрами 40 мкм и 25 мкм для КТ315. Для приборов КТ816 из-за низкой температуры плавления припойной композиции температура разварки была снижена с 255–270°C до 210 °С на вариантах № 1, 2, 3, 4, 7, 8 и до 225–235 °С на вар. № 5, 6, 9, 10. Изделия КТ 816, КТ 315 были проведены по существующему технологическому маршруту и переданы на участок измерения электрических параметров. Выход годных приборов составил: для КТ816 от 53,3 % по вар. 7 до 93,3 % по вар. 4, что ниже уровня текущего (95 %); для КТ 315 – 94,4 % (табл. 12.3). Выход годных изделий на опытном варианте 1 и 9 (КТ 816) и КТ 315 находился на уровне текущего (92,8), а на остальных вариантах – ниже планового уровня на 9–39 %.

Таблица 12.3.

Варианты припойных композиций и выход годных приборов

Вариант	Тип прибора, состав композиции	Выход годных приборов, %
	Изделие КТ816	
	Ag ₁ Sn Ag ₂	
1	Ag ₁ =Ag ₂ =0,2 мкм, Sn=12,0 мкм	95,0
2	Ag ₁ =Ag ₂ =0,2 мкм, Sn=9,0 мкм	88,3
3	Ag ₁ = Ag ₂ =0,45 мкм,	84,2
4	Sn=12,0 мкм	90,8
5	Ag ₁ = Ag ₂ =0,45 мкм, Sn=9,0 мкм	88,3
6	Ag ₁ = Ag ₂ =1,5 мкм,	83,3
	Sn=12,0 мкм	
7	Ag ₁ = Ag ₂ =1,5 мкм, Sn=9,0 мкм	54,2

8	Ag Sn	85,0
9	Ag=0,45 мкм, Sn=12,0 мкм	92,5
10	Ag=0,45 мкм, Sn=9,0 мкм	83,3
	Ag=1,5 мкм, Sn=12,0 мкм	
11	Ag=1,5 мкм, Sn=9,0 мкм	94,4
	Изделие КТ 315	
12	Ag ₁ = Ag ₂ = 0,6 мкм, Sn = 8,0 мкм	88,8
13	Изделие КП 743А1	90,5
	Ag ₁ = Ag ₂ = 0,6 мкм, Sn = 8,0 мкм	

При выборе более низкой температуре разварки (для исключения отслоения кристаллов) наблюдались дефекты в виде отслаивания и непровары сварных точек. Основной вид брака характеризовался превышением напряжения $U_{кэн} > N$. Как видно из рис. 12.19, толщина припоя под кристаллом составляет 3,5–7,0 мкм для вариантов, содержащих двухслойное серебро Ag–Sn–Ag, а для однослойного серебра Ag–Sn толщина паяного соединения составила 10,5–12,0 мкм.

Анализ брака выявил такие дефекты, как сколы, смещения кристалла, отслаивание проволочных соединений. Значения электрических параметров опытных приборов соответствовали нормативным данным. В результате опробования двухкомпонентной системы Sn–Ag в качестве бессвинцовой припойной композиции для сборки полупроводниковых приборов установлено:

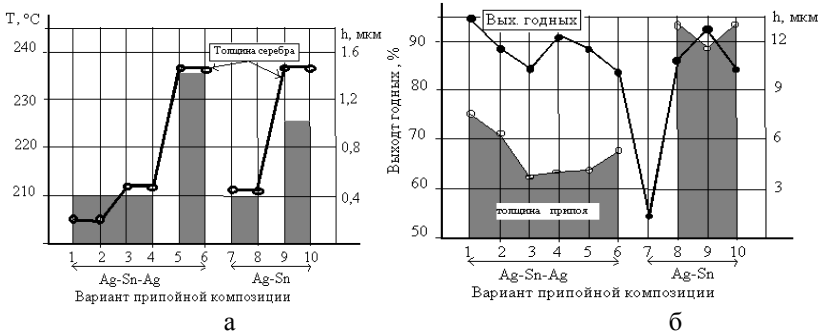


Рис. 12.19. Влияние состава припойной композиции и толщины серебра на температуру разварки выводов (а) и выход годных приборов (б)

1. Неравномерность распределения элементов припойной композиции по глубине нарушает стехиометрический состав припойной композиции и изменяет температуру ее плавления, способствуя невоспроизводимости процесса сборки. Для устранения этого необходима оптимизация режимов магнетронного распыления компонентов.

2. Увеличение мощности магнетронного напыления Ag толщиной 1,5 мкм вызывает неравномерный перегрев пластин по площади и оплавление припойной композиции.

3. При разварке золотых выводов возникают трудности, связанные с необходимостью подбора более низкой температуры, при этом более предпочтительны варианты, содержащие серебро толщиной 1,5 мкм.

4. Поскольку бессвинцовые припои имеют меньшую смачиваемость и текучесть, чем эвтектические оловянно-свинцовые, то для улучшения текучести требуются либо защитная атмосфера, либо вибраций в зоне монтажа кристаллов.

5. Выход годных изделий на опытных вариантах 1 и 9 для изделий КТ816 и КТ 315 составляет 92,8 – 95%, а на остальных – ниже планового уровня на 9-39 %, что связано с невоспроизводимостью процесса разварки выводов при сравнительно низкой температуре.

12.5. Пайка высокотемпературных сверхпроводниковых материалов

Открытие в 1986г. высокотемпературных ($>77\text{K}$) сверхпроводников ($\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$) открыло путь к новым промышленным разработкам, особенно в области переключающих приборов. Электрические контакты между токовыми выводами и сверхпроводниками весьма критичны к значительным токовым нагрузкам, поскольку рассеивание в них энергии может вызвать необратимые изменения в сверхпроводнике.

Выбор контактного материала для этих материалов должен удовлетворять следующим требованиям: хорошей смачиваемости; низкого контактного сопротивления; химической инертностью к YBaCuO ; хорошей адгезией к последнему; стабильностью во времени; устойчивостью к тепловой обработке.

Наилучшие результаты получены для системы $\text{ZrO}_2/\text{YBaCuO}/\text{Ag}$, которая была получена высокочастотным напылением сверхпроводникового материала толщиной 0.9 мкм YBaCuO при плотности тока 10^6 A/cm^2 на поликристаллическую подложку циркония, стабилизированную 8% Y_2O_3 и подвергнутую тепловой обработке при 860°C в атмосфере аргона и охлажденной в кислороде для получения

сверхпроводниковой фазы. Контактные площадки размером от 0,2 до 1,5 см² получают магнетронным напылением пленки 99,99% Ag на материал YBaCuO через маску из нержавеющей стали [413].

Площадки отлично смачивались припоем, и к ним припоем Sn/Pb/63/37 припаявались луженые медные проводники сечением 1,0 мм² при температуре 200-220°С. Такая методика позволила получить контактное сопротивление менее, чем 50 мкОм, что соответствовало контакту сопротивлением порядка 10⁻⁶ Ом/см².

Хорошие контакты должны удовлетворять следующим требованиям: $R_{\text{контакта}} < R_{\text{проводника}}$, т.е. рассеивание энергии внутри контактного сопротивления R_c должно быть меньше чем в выводах; стабильность контакта должна отвечать критерию Стекли, который связывает величину Джоулева тепла создаваемого энергией W для данного тока I в зависимости от энергии Q , которую криогенное поле удаляет конвекцией:

$$\alpha = \frac{W}{Q} = \frac{R_c I^2}{h \cdot S_c \cdot (T_c - 77K)}, \quad (12.10)$$

где S_c –площадь контакта теплопередачи, h –коэффициент теплопередачи.

Система стабильна, если $\alpha < 1$. При мощности 6кВт/м² контактное сопротивление должно быть меньше, чем 150 мкОм для тока в 20А.

Глава 13. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

13.1. Методы контроля качества соединений

Контроль качества предусматривает следующие способы оценки паяных соединений [8,10]: по внешнему виду с использованием эталона угла смачивания при 100%-ном контроле, по переходному сопротивлению контакта выборочно для различных проводников, по прочности на отрыв при выборочном контроле на образцах–свидетелях, анализ структуры припоя и характера диффузионной зоны выборочно для образцов-свидетелей, по надежности путем определения интенсивности отказов в течение заданного срока испытаний.

Качество паяных соединений по внешнему виду проверяется при помощи бинокулярного микроскопа типа МБС–9 с кратностью

увеличения $\times 56$. Соединения с гладкой блестящей поверхностью без трещин и следов перегрева, с полностью заполненным зазором между паяемыми деталями (при угле смачивания $5-10^\circ$) считаются высококачественными. Одновременно отмечаются такие дефекты, как холодный непрогретый спай, избыток или недостаток припоя, короткозамыкающее паяное соединение.

Для повышения объективности визуального контроля и удобства в работе используют стереомикроскопы Mantis фирмы Macro Vision Engineering с хорошими эргономическими показателями, увеличением в 2,5–5,0 раз, освещением рабочего поля 9500 люкс, возможностью безокулярного наблюдения [413] (рис. 13.1) или рабочие места визуального контроля VS8.



Рис. 13.1. Стереомикроскоп Mantis Macro

Недостатками визуального контроля являются: ограниченные возможности зрения, человеческий фактор, невозможность выявления скрытых или потенциальных дефектов.

Для автоматической оптической инспекции технологических дефектов сборки электронных модулей с высокой плотностью монтажа применяют систему визуального контроля VT9500С, которая позволяет контролировать точность установки компонентов с минимальным размером 0402, шагом между выводами компонента 0,4 мм и производительностью до $13 \text{ см}^2/\text{с}$. Одновременно контролируется реальное количество припоя и форма галтели для каждого паяного соединения. При автоматической оптической инспекции могут быть выявлены также следующие дефекты, которые в сравнении с возможностями электрического контроля (ЭК), приведены в табл. 13.1. Как видно из табл. 13.1 системы автоматической оптической инспекции позволяют существенно расширить перечень выявляемых технологических дефектов на этапе сборки модулей [414].

Для контроля качества соединений компонентов BGA, μ BGA, CSP, Flip Chip, выводы которых не видны, используют автоматические

системы комбинированного контроля. Эти системы сочетают в себе автоматический оптический и рентгеновский контроль, что позволяет распознавать как все визуальные, так и все невидимые дефекты, скрытые под корпусами компонентов. Такое сочетание позволяет осуществлять одновременный контроль SMD и выводных компонентов, а также инспектировать качество нанесения паяльной пасты и соединений в закрытых для визуального контроля областях [415].

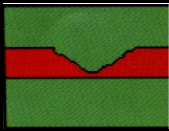
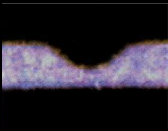
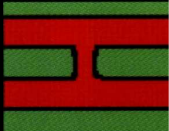
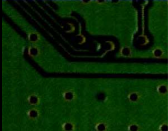
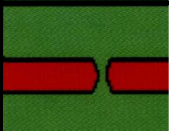



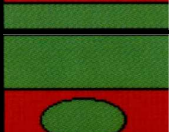




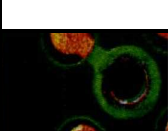
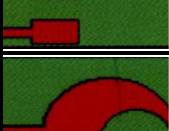

Комбинированная система контроля X7055 компании VISCOM отличается высокой скоростью работы, возможностью контроля установки компонентов с шагом 0,3 мм и рентгеновского контроля скрытых дефектов соединений. Система оснащена ортогональными 4-мегапиксельными камерами с линейным разрешением 10 мкм и угловым разрешением 22 мкм.

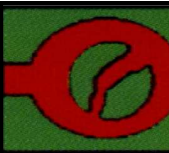
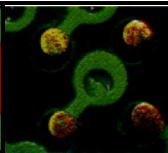
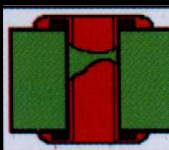

Рентгеновский модуль оснащен микрофокусной рентгеновской трубкой с напряжением 120 или 160 кВ и точностью распознавания менее 2 мкм. Для увеличения пропускной способности возможен вариант оснащения системы двойным конвейером с размером платы до 200x280 мм. X7055 может работать как отдельное устройство либо может быть интегрирован в технологическую линию поверхностного монтажа. При помощи специального программного обеспечения можно программировать и оптимизировать производственный процесс в режиме offline на отдельном компьютере.

Таблица 13.1.

Виды дефектов и возможности их диагностики

Тип дефекта	Возможность диагностики средствами		Примеры дефектов	Фотографии дефектов
	ЭК	АОИ		
Почти перемычка	нет	да		

Почти обрыв	нет	да		
Перемычка	да	да		
Обрыв	да	да		
Критичное включение	нет	да		
Перетрав печатного проводника	нет	да		
Повреждение печатного проводника	нет	ДА		
Повреждение контактных площадок	нет	да		
Несовмещение отверстия с контактной площадкой	нет	да		

Забитое отверстие	нет	да		
Обрыв металлизации и в отверстии	да	нет		

Для оценки структуры припоя приготавливают металлографические шлифы, которые исследуют с помощью оптических микроскопов МИМ-7, ММР-2Р и др. При этом обращают внимание на то, что надежному паяному соединению соответствует мелкозернистая плотная структура припоя, что свидетельствует об оптимальных режимах процесса пайки и охлаждения. Путем химического травления микрошлифов паяных соединений выявляют диффузионную зону между припоем и основным металлом, в зависимости от ширины которой судят о качестве паяного соединения. При перегреве происходит глубокая взаимная диффузия основного металла и припоя, частичное растворение (эрозия) металла в припое, что приводит к образованию в нем интерметаллидов, снижающих прочность соединения. При недогреве глубина диффузии чрезвычайно мала, прочность чисто адгезионного спая недостаточна для обеспечения требуемой надежности контактного соединения.

Для исследования поверхности соединений без их разрушений используют электронный растровый микроскоп. Варьируя энергию электронов луча и изделия, а тем самым и глубину их проникновения, определяют пространственный рельеф и качество паяного соединения. Растровая электронная микроскопия (РЭМ) характеризуется по сравнению с оптической микроскопией более высокими значениями пространственного разрешения и глубины резкости, а также возможностью одновременного проведения химического атомарного анализа на основе регистрации спектра характеристического рентгеновского излучения, генерируемого при облучении поверхности образца электронным лучом. Пространственное разрешение при оптимальных условиях порядка 10 нм, а глубины резкости находятся в пределах 2-4 мкм при увеличении $\times 10000$ и 0,2-0,4 мм при $\times 100$ [416].

Исследования структуры паяного соединения с локальным рентгеноспектральным анализом элементного состава могут быть выполнены на растровом электронном микроскопе Stereoscan-360 (Cambridge Instruments, Англия) с энергетическим спектрометром AN-10000 (Link, Англия) при ускоряющем напряжении (0,2–40) кВ и диапазоне увеличений от $\times 10$ до $\times 100000$ в режиме отраженных и вторичных электронов с фоторегистрацией результатов и получением псевдоцветного изображения. Для исследований необходимы образцы размером 15,0x15,0x1,0 мм. Диапазон контролируемых размеров – от 0,5 мкм до 10 мм. Рентгеноспектральный анализ элементного состава может выполняться локально в точках диаметром 1 мкм при чувствительности до 0,5–1,0% атомов и диапазоне анализируемых элементов от В до U [417].

Дефекты в паяных соединениях (поры, раковины, трещины) могут быть обнаружены с помощью телевизионно-рентгеновского микроскопа МТР-3 или ультразвуковым контролем. Ультразвуковой контроль основан на изменении структуры акустического поля частотой 0,5–25 МГц при наличии в паяном соединении дефектов, отражающих ультразвуковые колебания. Универсальные ультразвуковые дефектоскопы типа УДМ-1М позволяют обнаруживать раковины, трещины, поры, расслоения и другие дефекты в паяных соединениях.

Определенная часть дефектов (иногда до 60%) может быть выявлена методом модуляции электрического сигнала, который основан на свойстве дефектов паяных соединений служить модуляторами сигнала. Контрольная аппаратура включает генератор с регулируемым переменным напряжением частотой 10–100 кГц; блок индикатора, состоящий из двухкаскадного предварительного усилителя, детектора и указателя уровня: фильтр-пробку, настроенную на фиксированную частоту (например, 3–5 кГц); двухкаскадный оконечный усилитель, осциллограф или громкоговоритель. После настройки генератора на частоту фильтра-пробки контролируемую схему подвергают вибрациям, при этом любое изменение омического сопротивления паяного соединения вызывает появление сигнала другой частоты, отличной от частоты генератора.

Одним из перспективных методов объективного контроля паяных соединений является оценка их температурного перепада. В данном методе контролируемую плату подключают к источнику питания и генератору импульсов фиксированной частоты. После установления теплового равновесия плату со стороны паек сканируют инфракрасным датчиком тепловизора. Тепловизор позволяет воспроизводить перепады

температур на поверхности исследуемого изделия, используя естественное инфракрасное излучение. Таким образом, обнаруживаются зоны локальных перегревов, соответствующие дефектным паяным соединениям, которые имеют температуру на 1–5°C выше номинальной. В качестве датчиков используют фотоболометры и другие инфракрасные детекторы. Тепловизор ТВ-03 (СССР) имел температурное разрешение 0,2°C в диапазоне измеряемых температур – 20–200°C [418], а тепловизионная система Thermovision 880 фирмы AGEMA (Швеция) – 0,1°C в диапазоне температур от –20 до 1500°C. В состав системы входит ИК сканер с временной разверткой 25 кадров/с, обрабатывающая информацию ЭВМ и дисплей.

Повышение качества контроля паяных соединений достигается путем применения лазерной системы контроля дефектов (рис. 13.2) [419]. С помощью гелий-неонового лазера устанавливают точное местоположение контролируемого элемента 3 в системе X–Y координат передвижного столика 4. Контрольные лучи излучает мощный неодимовый лазер, работающий в инфракрасной области с длительностью излучения, которую задает микропроцессор, связанный с затвором 1. Луч, управляемый зеркалом 2, падает на место пайки на контрольном элементе, причем большая часть света отражается от блестящей и однородной поверхности пайки. Если структура пайки зернистая, то она начинает поглощать энергию луча, нагревается и посылает инфракрасное вторичное излучение. Собранное в линзах 5 и отраженное зеркалом излучение воспринимается инфракрасным датчиком 6, сигнал с которого анализируется с помощью микропроцессора и подается на осциллограф в виде термограммы. Лазерным контролем обнаруживаются такие дефекты соединения, как раковины, внутренние включения, поскольку они имеют меньшую массу и нагреваются по этой причине быстрее, чем сплошные паяные соединения [420]. Разогревание паяного соединения с помощью неодимового лазера выходной мощностью 60 Вт происходит за 50 мс. В итоге удается контролировать в секунду около десяти паяных соединений, которые расположены на расстоянии 1,25 мм друг от друга.

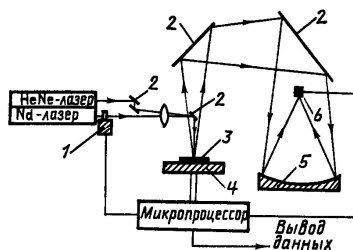


Рис. 13.2. Схема лазерной системы контроля паяных соединений

Если в дополнение к лазерной установке предусмотреть УЗ контроль, то можно определить и те дефекты, которые не могут быть обнаружены с помощью лазера. Автоматизированный контроль паяных соединений с помощью лазерной системы позволяет значительно увеличить производительность контроля паяных соединений, для чего микропроцессору задается программа расположения паяных соединений на плате или на выводах микросхем [421].

Мощность поверхностного источника тепла зависит от мощности потока лазерного излучения, а также от эффективности его поглощения поверхностью. На эффективность поглощения оказывает влияние состояние поверхности соединений. Загрязненная, либо окисленная, либо имеющая внешние дефекты поверхность поглощает излучение сильнее, чем нормальная, имеющая выраженный зеркальный блеск. В результате соединения с поверхностными дефектами нагреваются интенсивнее, что отражается на величине температуры насыщения, пропорциональной коэффициентам поглощения.

На релаксационные процессы внутри соединений оказывает влияние количество припоя и его распределение, наличие или отсутствие внутренних неоднородностей, связанных с неполным ее оплавлением или сформированных при механических воздействиях во время кристаллизации, а также внутренних включений или раковин. На качество теплового контакта соединения с подводящими проводниками оказывают влияние изменение сечения контакта, вызванное смещением в ходе пайки вывода элемента относительно контактной площадки или дефектностью формовки вывода, плохими условиями смачивания вследствие неоптимального температурного режима пайки и нарушения сплошности контакта, вызванные механическими смещениями в процессе кристаллизации [422]. Поэтому параметр времени релаксации температур в соединении дает ценную информацию о внутренней структуре и о качестве контакта с подводящими проводниками.

13.2. Методы контроля электрических и физико-механических свойств соединений

Переходное сопротивление паяного соединения измеряется методом разности потенциалов между двумя точками, расположенными на расстояниях X и Y от границы раздела соединяемых металлов (рис. 13.3). Величина переходного сопротивления R_n определяется как:

$$R_n = U/I - R_x - R_y, \quad (13.1)$$

где U – величина измеренного напряжения; I – ток, протекающий через соединение; R_x, R_y – сопротивления участков X и Y .

Измерения проводят на постоянном токе, так как на переменном возникает поверхностный эффект, искажающий значения измерений. Величина переходного сопротивления надежного паяного соединения находится в пределах $(2-3) \cdot 10^{-3}$ Ом. Для измерения переходного сопротивления соединений при помощи универсального вольтметра В7-46 с микропроцессорным управлением собирают 4-х проводную схему (рис. 13.4).

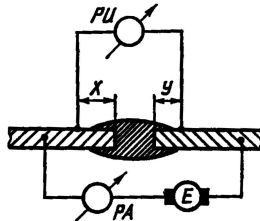


Рис. 13.3. Схема измерения переходного сопротивления паяного соединения

С помощью вольтметра В7-46 проводят математическую статистическую обработку результатов измерений после соответствующего программирования. Перед измерениями вольтметр программируют и проводят 10 измерений искомой величины с индикацией среднего значения, что позволяет получить достоверные результаты измерений. В качестве штырей-зондов использовались латунные выводы с нанесенным на них серебряным или золотым покрытием. Переходное сопротивление определяется, как

$$R_{пер} = R_{изм} - R_{сх}, \quad (13.2)$$

где $R_{изм}$ – измеренное значение сопротивления, $R_{сх}$ – сопротивление схемы измерений, которое определялось по формуле

$$R_{сх} = R_1 + R_2 = \rho_1 \frac{l_1}{b \cdot \delta} + \rho_2 \frac{l_2}{b \cdot h}, \quad (13.3)$$

где ρ_1, ρ_2 - удельные сопротивления припоя и материала паяемой детали соответственно, b - ширина зоны лужения, h - толщина детали, δ - толщина припоя.

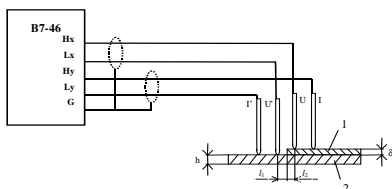


Рис. 13.4. Схема измерения переходного сопротивления:
1 - слой припоя толщиной δ , 2 - паяемый материал

Погрешность измерений определяется типом измеряемой структуры, толщиной δ и составляет до 5 % . Для уменьшения погрешности измерения проводят при температуре окружающей среды $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ и относительной влажности $(65 \pm 15)\%$, расстоянии между зондами 1 значительно превышающими диаметр точечного контакта зонда и более чем в 2 раза - толщину покрытия [423].

При автоматическом электрическом контроле соединений используют системы электрического контроля с летающими пробниками SPEA 4040, которые осуществляют подачу питания и прием сигнала от контролируемого соединения на плате или компонента с автоматической проверкой работоспособности. Современные технологии электрического контроля позволяют обойтись без специальных контактных площадок. Так, для SPEA 4040 достаточно использовать площадки с шагом 100 мкм. Однако в крупносерийном производстве для сокращения времени контроля применяют специализированные адаптеры типа «ложе гвоздей», и тогда контактные площадки необходимо занести на шаг 2,54 мм [424]. Производительность контроля системы SPEA 4040 составляет от 20 до 50 тестов/с в зависимости от количества летающих пробников (рис. 13.5). Система обеспечивает функциональный контроль электронных сборок в большом диапазоне программируемых токов, (5–30 А), напряжений (0–100) и сопротивлений (0,001 Ом–100 МОм) [425].

Критериями оценки прочности паяных соединений являются

величина усилия отрыва, устойчивость соединений при воздействии знакопеременных нагрузок и вибропрочность. Прочность на отрыв определяют по среднему значению усилия отрыва, которое для паяного соединения меди припоем ПОС61 при оптимальных режимах оказывается не менее 30 МПа.

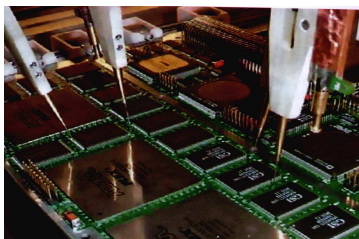


Рис. 13.5. Система летающих пробников для электрического контроля соединений

Исследования прочности на разрыв P в паяных соединениях меди припоем ПОС61 показывают, что достаточная прочность обеспечивается при ширине диффузионной зоны 0,8–1,2 мкм (рис. 13.6) [426].

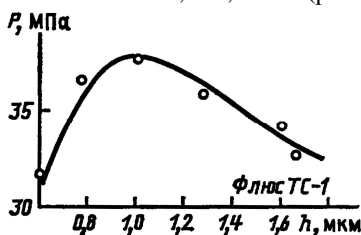


Рис. 13.6. Зависимость предела прочности паяного соединения от ширины диффузионной зоны

Устойчивость паяных соединений при воздействии знакопеременных нагрузок оценивают по среднему числу циклов закручивания на угол $\varphi = \pm 0,75$ град/мм и среднему числу циклов изгиба вывода l на угол $\alpha = \pm 10^\circ$ относительно платы 2 с частотой 50–100 циклов в минуту и одновременным воздействием осевой нагрузки P , равной 0,1–0,5 величины усилия статического разрыва припоя 3 (рис. 13.7). Вибропрочность оценивают по времени, в течение которого паяные соединения противостоят разрушению под действием вибрации

с частотой 50–2000 Гц и ускорением, соответствующим максимальным ускорениям при нормальной эксплуатации аппаратуры.

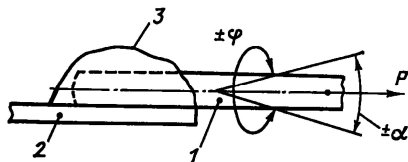


Рис. 13.7. Схема приложения знакопеременных нагрузок при испытании паяного соединения

Методы контроля качества металлизированных покрытий разделяются на две группы: разрушающие и неразрушающие. Испытания с разрушением паяных соединений применяются для определения их механических и физико-механических свойств. Механические испытания различаются по способу нагружения и характеру его изменения во времени. Для паяных соединений наибольшее распространение получили испытания на срез и на отрыв. Испытания паяных образцов на срез с приложением растягивающей нагрузки проводят на плоских и круглых образцах, спаянных внахлестку.

Прочность сцепления покрытия с основным материалом—одна из важнейших характеристик металлического покрытия, наносимого под воздействием УЗ колебаний на неметаллический материал. Оценивается она методом нормального отрыва испытательного приспособления, припаянного легкоплавким припоем к металлическому покрытию. Существующие методики используют различные виды испытательных приспособлений: проволочный крючок диаметром 0,8–1,0 мм, металлический стержень диаметром 3–5 мм, рамку площадью 6 мм², диск такой же площадью. Лучшие результаты получены при использовании приспособления с диском. При пайке площадь растекания припоя ограничивается трафаретом, имеющим диаметр на 1–2 мм больший диаметра диска [427].

Перпендикулярность оси диска по отношению к металлическому покрытию обеспечивают с помощью специального приспособления, фиксирующего положение стержня в момент пайки. Температуру паяльника поддерживают на заданном уровне посредством автоматических регуляторов или электронных потенциометров. Эти меры позволяют в значительной степени уменьшить разброс экспериментальных данных [428].

Для испытаний на прочность сцепления используют различные типы

разрывных машин, например РМИ-250, РМ-50 и др. Лучшие результаты могут быть получены на машинах с регулируемым усилием нагружения, поскольку неметаллические материалы в большинстве своем хрупки и поэтому чувствительны к воздействию ударных нагрузок (табл. 13.2).

Для определения прочности сцепления паяных соединений со стеклокерамическими материалами, полученных ультразвуковой металлизацией, разработана специальная методика пайки испытательного приспособления и его отрыва [101]. К слою металлизации припоем ПОС 61 с использованием спиртоканифольного флюса припаявалось испытательное приспособление с площадью основания $0,1 \text{ см}^2$. С целью исключения появления термотрещин и ослаблении механической прочности стеклокерамики образцы предварительно подогревались до величины не менее $0,5\text{--}0,7$ температуры плавления припоя. Такая температура подогрева была определена экспериментально и согласуется с литературными данными о подогреве блоков керамических конденсаторов при электрическом монтаже до 110°C [428].

При пайке приспособления температура жала паяльника поддерживалась на уровне $225 \pm 5^\circ\text{C}$ с помощью прибора-регулятора температуры жала паяльника. Для уменьшения возможных грубых погрешностей при измерениях приспособление устанавливалось строго перпендикулярно к испытываемой поверхности. Отрыв испытательного приспособления осуществлялся нормально к поверхности образца на разрывной машине РП 100-1 при скорости движения нижнего захвата $0,6 \pm 0,03 \text{ м/мин}$. Прочность сцепления оценивалась по величине усилия отрыва, определяемого по шкале разрывной машины с точностью $\pm 0,49 \text{ Н}$, отнесенного к площади отрыва, подсчитанного под микроскопом МБС-9. Каждое значение прочности отрыва находилось как среднее арифметическое значение результатов испытаний пяти образцов. Для повышения точности измерений величины прочности сцепления, а также уменьшения разброса измерения нагружения образцов осуществляли в два этапа: предварительное со скоростью $1,5\text{--}1,8 \text{ кН/мин}$ до усилия 98 Н и основное со скоростью $8,8 \text{ кН/мин}$. Для предварительного нагружения применялось специальное устройство с тарированной пружины. Устройство (рис. 13.8) в виде стакана 1 с помощью крючков соединялось с верхним захватом разрывной машины и с испытательным приспособлением 4, припаянным к образцу 5. При движении нижнего захвата 6 разрывной машины пружина 2 растягивалась до момента жесткого контакта ограничительного элемента 3 со стенкой приспособления. Плавный режим нагружения

хрупких неметаллических материалов позволил исключить влияние ударных воздействий и повысить тем самым точность показаний.

Неразрушающие методы контроля спаев с керамическими и стеклокерамическими материалами разработаны в меньшей степени. Отсутствие неразрушающих методов количественного контроля прочности спаев известным образом сказывается на качестве изделий.

Таблица 13.2

Технические характеристики разрывных машин

Технические данные	РМУ-0,005-1	Р-0,5	Р-5	РП-100-1
Наибольшая нагрузка, кг	50	500	5000	100
Диапазон нагрузки, кг				
А	0—10	0—100	0—1000	5—50
Б	0—25	0—250	0—2500	10—100
В	0—50	0—500	0—5000	---
Погрешность измерения нагрузки, %	1	1	1	2
Скорость рабочего хода захвата, мм/мин	0,5—100	0,5—1000	1—100	600±30
Расстояние между захватами, мм	400	700	700	470
Регистрация нагрузки	Диаграмма	Диаграмма	Диаграмма	По шкале
Потребляемая мощность, кВт	0,5	0,5	2,0	0,18
Габаритные размеры, мм	520х 640х 1460	460х 1260х 1850	1400х 710х 2065	280х 620х 1510
Масса, кг	225	570	750	145

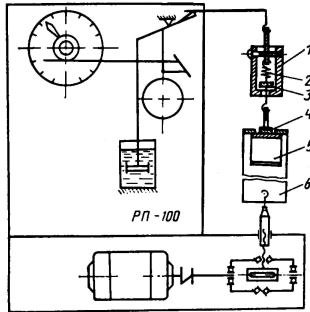


Рис. 13.8. Схема испытаний на прочность сцепления металлизации с неметаллическими материалами

Предложен неразрушающий метод оценки качества металлизации, использующий явление абсорбции конденсаторов, которое заключается в том, что если разрядить заряженный конденсатор, то через некоторое время на его электродах восстанавливается напряжение, величина которого зависит от степени неоднородности диэлектрика, наличия в нем внутренних дефектов и других факторов. Отношение остаточного напряжения к зарядному характеризуется коэффициентом абсорбции конденсаторов [429]. Метод был использован для оценки качества металлизации вакуумно-плотных спаев керамики 22ХС с металлами. Результаты испытания показали зависимость величины восстанавливающего напряжения от вакуумной плотности металлокерамических соединений.

13.3. Методы контроля скрытых дефектов соединений

Применение интегральных микросхем в корпусах BGA, μ BGA, Flip Chip и CSP в современных электронных модулях на печатных платах создает проблему контроля качества паяных соединений, находящихся под корпусами интегральных микросхем и недоступных традиционным визуальным и оптическим методам. Положение также усугубляется увеличением стоимости интегральных микросхем, когда замена является дорогостоящей, трудоёмкой и может привести к выходу из строя всего электронного модуля. Кроме того, необходимо учитывать возможность появления скрытых дефектов, связанных с плохой смачиваемостью и паяемостью выводов и контактных площадок, пустотами в паяных соединениях и пластмассовых корпусах интегральных микросхем, нарушением металлизации переходных

отверстий. Все указанные дефекты могут быть эффективно выявлены и локализованы методами рентгеновского контроля.

Компанией Phoenix|XRAI выпущена система рентгеновского контроля нового поколения psba|analyzer с нанофокусной трубкой и разрешением 0,5 мкм (рис. 13.9), которая позволяет надёжно диагностировать и локализовать следующие типы дефектов: внутри полупроводниковых приборов (рис. 13.10,а), качество разварки соединительного проводника кристалл–рамка, пустоты между подложкой и кристаллом, пустоты в корпусе, качество соединений в BGA (рис. 13.10,б) [430].



Рис. 13.9. Нанофокусная система рентгеновского контроля

Применение систем рентгеновского контроля является эффективным средством диагностики технологических дефектов, повышения качества и надёжности выпускаемых изделий за счёт обеспечения контроля каждого паяного соединения и целостности ИМС.

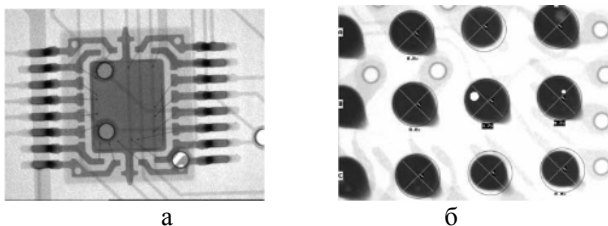


Рис. 13.10. Контроль внутреннего состояния полупроводниковых приборов и качества паяных соединений BGA

Система рентгеновского контроля FXS-160.40 компании TIGER спроектирована специально для контроля BGA и Flip-Chip, а также она пригодна для контроля электромеханических компонентов, сенсоров, катушек, предохранителей и т.д. Для выявления субмикронных дефектов в большей степени подходит система FOX-160.25 с мощной нанофокусной трубкой, геометрическим увеличением до 2400 раз, 5 степенями свободы и обработкой изображения в реальном масштабе времени [431].

Для выявления скрытых дефектов в соединениях, изделиях, анализа напряженно-деформированного состояния материалов применяют акустическую микроскопию с фото- или телерегистрацией результатов анализа [432]. Акустическая микроскопия использует высокочастотные (от 5 до 200 МГц) УЗ колебания и осуществляется методами сквозной передачи и отраженного сигнала. Метод отраженного сигнала, требующий доступа только к одной стороне изделия, позволяет обнаруживать скрытые дефекты при посадке кристаллов, разварке проволочных соединений, монтаже SMD, герметизации электронных модулей. Акустическая микроскопия в большей степени подходит для контроля соединений в многокристалльных модулях [433].

Для бесконтактного возбуждения и приема акустических колебаний в исследуемых объектах часто используются различные термо- и оптико-акустические эффекты. Если быстро нагреть какой-либо участок твердого тела, то другие его участки нагреваются спустя некоторое время. Локальный нагрев изделия вызовет появление термомеханических напряжений и акустических волн, так как тепловое возмущение распространяется значительно медленнее упругого. В качестве источников нагрева могут быть использованы любые модулированные по интенсивности источники электромагнитного излучения: лазерные, электронные, ионные [434-436]. Выбор источника нагрева и частоты модуляции определяется свойствами объекта, необходимой мощностью, чувствительностью и разрешающей способностью аппаратуры, размерами пятна, в которое необходимо сфокусировать излучение.

Термоупругие деформации объекта приводят к возникновению акустических колебаний, регистрация которых осуществляется с помощью пьезоэлектрических датчиков, регистрация деформации области нагрева – с помощью интерферометров и координатных приемников, однако в отличие от «мираж-эффекта» вспомогательный лазерный луч отражается от поверхности в области нагрева.

Принцип действия фотоакустического микроскопа основан на явлении генерации и распространения в объекте тепловых волн, возбуждаемых зондирующим лазерным излучением или электронным пучком, модулированными по интенсивности I_0 [437]. Поглощенное излучение I_a приводит к нагреву и генерации периодических тепловых потоков Q_s и Q_g , распространяющихся соответственно в объекте и от его границы в окружающую газовую среду (рис.13.11, а). Решением уравнения термодиффузии, отвечающим данной ситуации, являются температурные волны, затухающие в e раз на длине распространения тепла $\mu_{s,g}$ в твердом теле и окружающей среде (рис.13.11, б):

$$\mu_{s,g} = \left(\frac{2k_{s,g}}{\rho_{s,g} c_{s,g} \omega} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (13.5)$$

где $k_{s,g}$ – теплопроводность, $\rho_{s,g}$ – плотность, $c_{s,g}$ – теплоемкость твердого тела и газа соответственно, ω – угловая частота модуляции излучения.

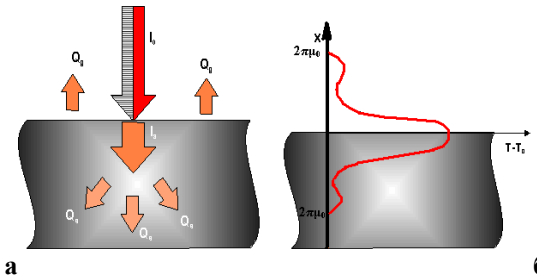


Рис. 13. 11. Механизм формирования фотоакустического сигнала

Вследствие периодического нагрева и тепловой деформации локальной области объекта в нем также возбуждаются и распространяются акустические волны той же частоты, что и температурные волны. Это явление получило название фотоакустического эффекта в твердом теле. Акустические колебания объекта регистрируются датчиком. Фотоакустический сигнал, снимаемый с датчика, для каждой выделенной области объекта зависит от ее локальных физических свойств. При сканировании лазерным лучом в двух взаимно ортогональных направлениях формируется фотоакустическое изображение объекта, которое является следствием трех различных процессов [437]:

- вариации поглощенной мощности излучения вследствие изменения от точки к точке оптических свойств объекта;
- взаимодействия температурных волн с тепловыми неоднородностями объекта;
- взаимодействия акустических волн с упругими неоднородностями объекта.

Первый процесс несет информацию только об абсорбционно отражательных свойствах образца. При доминировании этого процесса фотоакустическое изображение по существу идентично оптическому изображению. Разрешающая способность определяется диаметром зондирующего луча, а глубина визуализации подповерхностной структуры – глубиной проникновения фотонов.

Второй процесс не встречается ни в оптической, ни в акустической микроскопии и характеризуется переходом к новому типу волн, взаимодействующих с микронеоднородностями объекта и определяющих формирование изображения. Такой переход дает качественно новую информацию и позволяет существенно расширить наши познания о физических свойствах материалов. Определяется этот процесс термическими свойствами объекта: теплопроводностью, температуропроводностью коэффициентом теплового расширения.

Несмотря на сильное затухание (например, для меди $2 \text{ мм} \geq \mu_s \geq 2 \text{ мкм}$ при изменении частоты модуляции в диапазоне 10 Гц – 10 МГц температурные волны обладают характеристиками обычных волн и поэтому их взаимодействие с тепловыми неоднородностями твердого тела, по аналогии с оптическими и акустическими волнами, можно рассматривать как процессы рассеяния и отражения. Для используемых частот модуляции (до 10 МГц) более длинные, по сравнению с толщиной объекта, генерируемые наряду с температурными, акустические волны не взаимодействуют с объектом и служат лишь носителями информации, полученной за счет распространения температурных волн. Микроскоп, изображение в котором формируется главным образом вследствие взаимодействия температурных волн с тепловыми неоднородностями объекта, наряду с фотоакустическим получил название термоволнового микроскопа (ТВМ). Разрешающая способность ТВМ зависит от размера зондирующего луча и величины μ_s и определяется большим из этих двух параметров, а глубина визуализации оценивается значением μ_s .

Третий процесс несет информацию о механических параметрах объекта. Его необходимо учитывать, если длина акустической волны того же порядка, что и размеры неоднородностей в объекте (обычно это

происходит на частотах модуляции, превышающих 100 МГц). При определяющем вкладе данного процесса фотоакустическое изображение идентично акустическому, а разрешающая способность имеет порядок длины звуковой волны.

Акустические методы диагностики – акустическая микроскопия (АМ), сканирующая лазерная акустическая микроскопия (СЛАМ) и фотоакустическая микроскопия (ФАМ) – наиболее перспективны при контроле контактных микросоединений в изделиях микроэлектроники и электронной техники, как на этапе разработки, так и в их производстве.

В акустической микроскопии и сканирующей лазерной микроскопии первичная информация получается в результате генерации, взаимодействия и приема чисто акустических колебаний, а в лазерной фотоакустической микроскопии она возникает при оптическом взаимодействии импульсного лазерного излучения с поверхностью твердого тела. Амплитуда генерируемых акустических колебаний в ФАМ определяется, во-первых, коэффициентом оптического поглощения лазерного излучения в каждой точке поверхности сканируемого объекта и, во-вторых, мощным фоновым сигналом, который возникает вследствие удаления с поверхности объекта различных окислов и загрязнений при первичном сканировании лазерным лучом. Однако оптические, акустические и фоновые составляющие принимаемого фотоакустического сигнала создают на результирующей топограмме сложные изображения, для расшифровки которых требуется опыт и специальные методические разработки.

Лазерная фотоакустическая микроскопия имеет следующие преимущества перед акустической и сканирующей лазерной акустической микроскопией [438]:

- бесконтактное возбуждение акустических колебаний в твердом теле сфокусированным лучом лазера открывает широкие возможности сканирования объектов сложной конфигурации и относительно больших площадей;

- во многих случаях зависимость фотоакустического сигнала от величины оптического поглощения сканируемой поверхности позволяет получать одновременно и топограммы распределения оптического поглощения, а при использовании лазера с перестройкой по длине волны – видеоспектральные топограммы поглощения;

- конструкции АМ и СЛАМ и методики их применения требуют иммерсионного контакта акустической части с объектом, что в случае применения АМ значительно ограничивает площадь сканирования (не более 2x2 см), а для СЛАМ требует полного погружения объекта в

ванну с жидкостью. Эти требования исключаются при исследованиях с использованием ФАМ.

Хотя все три метода контроля (ФАМ, АМ и СЛАМ) могут дать в известных пределах идентичные результаты, однако лазерный фотоакустический метод предпочтителен благодаря перечисленным преимуществам, простоте конструкции и эксплуатации.

Первый отечественный фотоакустический микроскоп с разрешающей способностью 0,5 мкм ФМ–3М был создан Н.В. Рабодзеем в 1986 г. и экспонировался на международной выставке Метрология-86. Практика эксплуатации фотоакустических микроскопов показала, что благодаря их высокой чувствительности можно обнаруживать не выявляемые ранее неоднородности адгезии металлизационных покрытий, прочности паяных, сварных диффузионных микросоединений, что открывает путь к решению двух важных задач [439]:

- установления связей обнаруживаемых неоднородностей и дефектов с технологией и надежностью с целью отработки технологии и конструкции соединений;

- выработки критериев и норм брака при оперативной корректировке технологии.

По диапазону возможных применений в электронике фотоакустическая микроскопия является универсальным методом, обеспечивающим решение множества задач контроля, ранее требовавших использования многих и к тому же разрушающих методов. Бесконтактность и локальность оптического возбуждения акустических колебаний позволяют производить быстрое зондирование ответственных зон и участков изделия, а также топографировать распределение характеристик.

Благодаря запоминанию различных промежуточных состояний контролируемого образца, последовательно подвергаемого различным воздействиям, открываются возможности исследования динамики разрушения соединений и определения запасов их прочности. Факторами экономической эффективности лазерного фотоакустического метода являются:

- возможность коренного повышения качества деталей и изделий по ранее неконтролируемым характеристикам;

- однозначность получаемой информации, полностью отражающей физическую сущность контролируемой характеристики или свойства;

- универсальность применения для решения многих задач, исключаящая разработку других, узкоспециальных средств контроля;

– возможность контроля на ранних стадиях производства в процессе оптимизации технологий, когда стоимость бракуемых изделий невелика;

– однократность (во многих случаях) применения метода для стабилизации или корректировки технологии до уровня, исключающего необходимость введения контроля.

Серьезной проблемой фотоакустических систем является отсутствие метрологической базы, затрудняющей расшифровку получаемых фотоакустических изображений и интерпретацию результатов контроля. Однако отмеченные недостатки фотоакустических систем не умаляют достоинств и высокой технико-экономической эффективности этого метода, что подтверждается опытом эксплуатации отечественных диагностических комплексов.

В концерне «Планар» создан и эксплуатируется комплекс лазерного фотоакустического диагностирования и неразрушающего контроля качества сварных, паяных и адгезионных соединений в изделиях электроники [441]. В основе данного метода используется фотоакустический эффект, который возникает при точечном сканирующем воздействии модулированного лазерного излучения на исследуемый объект. Основными техническими характеристиками комплекса лазерного фотоакустического диагностирования являются:

- увеличение геометрическое - от 1:1 до 2500:1 крат на экране монитора 19";
- число градаций отображаемого параметра - 16;
- максимальное поле сканирования - 100x100 мм;
- размеры образца - до 10 мм (микросканирование) и до 65 мм (макросканирование);
- пространственная разрешающая способность - от 0,5 до 100 мкм;
- чувствительность к нарушению сплошности структуры - до 10 нм;
- число строк сканирования - 256.

Обработка параметров электрического сигнала обеспечивает возможность получения достоверной информации о неоднородностях внутренней структуры исследуемого объекта. Для интерпретации результатов контроля данная информация визуализируется в виде цветной 16-градационной двухмерной фотоакустической топограммы, на которой уровень максимальной сплошности (диффузия, адгезия, смачиваемость) материалов представлен чёрным цветом, а по мере увеличения несплошности (расслоения, полости, инородные включения) цветовая гамма меняется вплоть до белого цвета, проходя все цветовые оттенки, показанные на шкале (рис. 12.12) [442]:

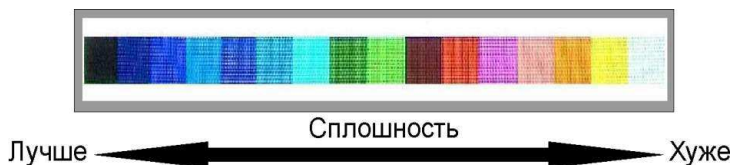


Рис. 13.12. Цветная 16-градационная шкала

Комплекс лазерного фотоакустического диагностирования (рис. 13.13) позволяет производить диагностику и неразрушающий пооперационный контроль качества:

- 1) присоединения кристаллов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем к основанию корпусов и кристаллодержателей с применением эвтектики, припойных и клеевых композиций;
- 2) микросварных соединений золотой, алюминиевой, медной и др. проволокой методами термозвуковой, термокомпрессионной, ультразвуковой микросварки;
- 3) сварных и паяных швов корпусов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем;
- 4) герметизации интегральных микросхем пресс-компаундами;
- 5) монтажа электронных компонентов на подложки (SMD, COB);
- 6) адгезии металлизированных покрытий к подложкам.



Рис. 13.13. Лазерный фотоакустический комплекс

Увеличенное оптическое изображение микросоединения, выполненного методом ультразвуковой микросварки внахлест алюминиевой проволокой диаметром 250 мкм к алюминиевой металлизации контактной площадки ИМС приведено на рис. 13.14, а, а

фотоакустическая топограмма, полученная при зондировании лучом УФ лазера диаметром 15 мкм со скоростью 0,048 мм/с на рис. 13.14, б.

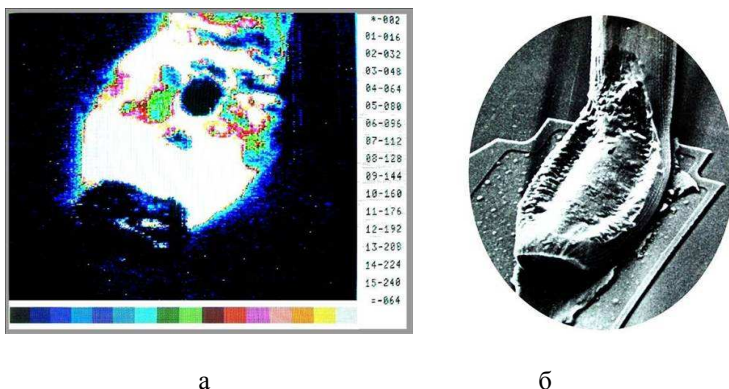


Рис. 13.14. Фотоакустическая топограмма микросоединения (а) и его оптическое изображение (б)

Зоны отсутствия сцепления соединяемых материалов (участки светлых тонов) свидетельствуют о некачественном микросоединении, причиной которому может являться недостаточная мощность ультразвука.

На рис. 13.15,а приведено оптическое изображение двух однотипных ИМС в пластмассовом корпусе, а на рис.13.15,б–лазерная фотоакустическая топограмма качественной (слева) и некачественной (справа) герметизации пресс-компаундами. Стрелками показаны участки явного течеобразования в местах отсутствия адгезии пресс-компаунда к внешним выводам рамки. Светло-красные области на топограмме свидетельствуют о наличии неоднородности в виде воздушных зазоров внутри пластмассовых корпусов.

Недостаточная адгезия прессматериала к рамке выводной возможно связана с загрязнением траверс при нанесении компаунда предварительной защиты на кристалл, либо неправильно выбранном режиме герметизации: недогрев таблеток прессматериала при нагреве в ВЧ установке, низкое давление прессования и, как следствие, большое время впрыска прессматериала.

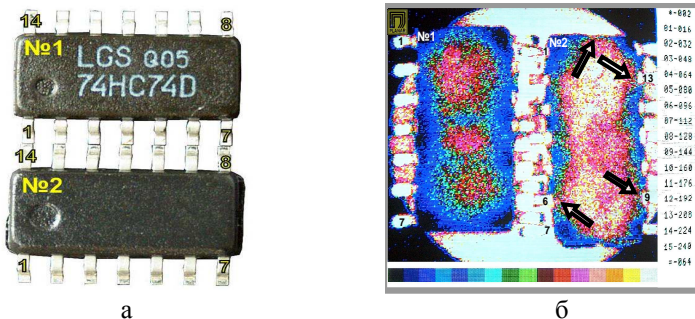


Рис. 13.15. ИМС (а) и их фотоакустические топограммы (б)

Для повышения эксплуатационной надёжности конструктивно сложных изделий электроники с многооперационной технологией их производства необходим систематический контроль стабильности технологических параметров процесса, а также эффективные методы и средства физико-химического анализа причин отказов, обусловленных скрытыми дефектами. При формировании внутренних межсоединений в изделиях, внедрении новых пресс-материалов для корпусирования изделий, выявления скрытых дефектов эффективным и достоверным является метод лазерного фотоакустического диагностирования, хорошо зарекомендовавший себя на практике.

13.4. Надёжность паяных соединений

Опыт эксплуатации изделий электроники свидетельствует о том, что отказы паяных соединений проявляются в течение всего срока службы (рис. 13.16). В основном доминируют два вида отказа: обрыв связи и короткие замыкания, которые практически равновероятны: 45 и 55 %. Обрыв связи в соединениях происходит тогда, когда нагрузка на него превышает его механическую прочность, которая со временем уменьшается в силу загрязнения, окисления, диффузии и образования интерметаллидов в припое.

Согласно нормативным документам количество примесей в припоях строго регламентировано. Однако в процессе пайки в результате растворения в расплавленном припое материалов выводов, металлической разводки МПП, деталей приспособлений, с которыми соприкасается припой, в него могут попасть Си, Al, Sn, Bi, Cd, Ni, Fe, Ag, Au и другие металлы. Большинство из них при достижении определенного для каждого из них предела начинают себя проявлять,

меня свойства припоя и оказывая соответствующее влияние на безотказность и долговечность ИМС.

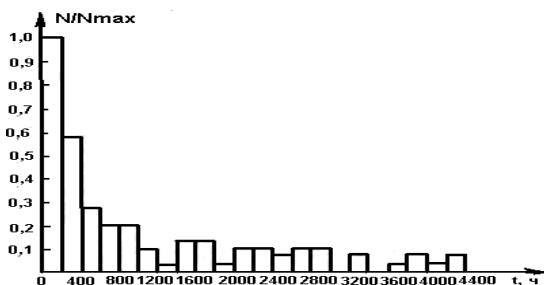


Рис. 13.16. Распределение отказов электронной аппаратуры из-за дефектов паяных соединений на этапе эксплуатации

Особенно легко растворяется в припое медь выводов и печатных проводников. Содержание $Cu > 0,3\%$ делает припой более вязким по сравнению с чистым, увеличивается время смачивания. ПС становится хрупким и зернистым. Применение паяльных масок — наиболее эффективный способ замедления процесса насыщения припоя медью. Аналогичное действие на припой оказывает присутствие в нем $0,2\%$ золота. Оно приводит к снижению прочности контактных соединений.

Присутствие в припое $0,2\%$ цинка ухудшает его растекаемость, повышает температуру пайки, приобретают пористую поверхность, увеличивается скорость окисления поверхности расплавленного припоя. Такое же действие оказывают на качество ПС Al ($0,01\%$), Cd ($0,02\%$), Fe ($0,02\%$). Висмут в количествах $0,25\%$ вызывает потускнение припоя. Добавка серебра в $Pb - Sn$ -припой значительно повышает его температуру плавления.

В основном насыщение припоя примесями происходит в процессе пайки. Растворение твердых металлов в жидких средах описывается уравнением [443]:

$$dQ/dt = k(C^* - C) S, \quad (13.6)$$

где dQ/dt — количество вещества, растворяющегося в единицу времени; k — константа скорости растворения; C_0^* — концентрация насыщенного раствора, C — фактическая концентрация раствора в данный момент времени; S — поверхность растворяющегося металла.

Константа скорости растворения, являющаяся основной кинетической характеристикой процесса растворения, определяется скоростями элементарных физических процессов, реализующихся при растворении твердых веществ в жидких. Процесс растворения твердых веществ в жидких относится к гетерогенным реакциям, протекающим в две стадии.

Первая стадия представляет собственно гетерогенную химическую реакцию (реакцию на границе раздела фаз) и заключается в установлении химической связи между атомами на поверхности твердого и жидкого металлов, а также в переходе атомов через межфазную границу. Лишь после завершения первой стадии растворения возникают условия для развития процессов гетеродиффузии, приводящих к изменению химического состава в объеме контактирующих металлов. Следует отметить, что диффузионные процессы начинаются по истечении некоторого промежутка времени, равного периоду релаксации пика межфазной энергии (так называемый период ретардации). При длительности контактирования металлов меньше периода ретардации можно получить соединение разнородных металлов без изменения их химического состава.

Однако расчеты показывают, что при взаимодействии расплавленного металла с твердым время задержки диффузионных процессов незначительно по сравнению со временем контактирования металлов при пайке, т. е. в реальных условиях пайки диффузионные процессы практически всегда протекают.

Вторая стадия растворения заключается в отведении атомов растворенного металла от межфазной границы в глубь жидкости. Это происходит в жидкости диффузией и конвекцией (растворенные атомы переносятся жидкостью в процессе ее движения). Конвекция может быть вынужденной и естественной. В последнем случае движение жидкости вызывают локальные изменения ее плотности, возникающие вследствие температурных флуктуации, а также флуктуации состава, неизбежной при растворении. Процессы обогащения припоя посторонними примесями происходят не только в процессе производства ИЭ, но и в условиях эксплуатации. Происходит обогащение припоя медью, атомы которой мигрируют по границам зерен припоя, поступая из металлизации МПП.

В контактах припой—медь происходит и образование интерметаллических соединений медь — олово. Установлено, что механически наиболее слабый участок паяного соединения находится вдоль границы интерметаллического соединения и оставшейся массы

припоя. Объясняется это тем, что сюда преимущественно вытесняются из расплава посторонние примеси.

Другой не менее важнейшей проблемой является окисление припоя олово—свинец. Быстрое перемешивание припоя интенсифицирует этот процесс: скорость окисления при пайке волной в 18 раз больше, чем в ванне со спокойным припоем. Олово лучше окисляется, чем свинец, поэтому оксидный слой обогащается оловом, а припой в ванне свинцом. Поэтому в паяльную ванну надо добавлять припой, обогащенный оловом.

Доминирующим механизмом отказов соединений является электрохимическая коррозия, представляющая собой процесс переноса ионов припоя в электролите под действием внешнего электрического смещения. В присутствии влаги происходит растворение свинца и переход ионов Pb^{2+} в водный раствор. Под влиянием электрического смещения между соединением и соседним участком металлизации ионы Pb^{2+} мигрируют в растворе к участкам металлизации, находящимся под отрицательным потенциалом.

На катоде ионы Pb^{2+} восстанавливаются до атомов и осаждаются в виде дендритов. Последние может приводить к увеличению токов утечки вплоть до коротких замыканий при очень малых расстояниях между участками металлизации, находящимися под разноименными зарядами. Если это расстояние значительно для перекрытия образующимися дендритными цепочками Pb , то преобладающим видом отказа является обрыв в соединениях. Влага в область соединений может попадать как в процессе изготовления ИЭ, так и при эксплуатации из-за не герметичности.

Потенциальным источником отказов соединений является наличие хлоридов. Если в процессе пайки используются канифольные флюсы, то негигроскопичная канифоль герметизирует эти хлориды и предотвращает образование белых продуктов коррозии. Однако если канифоль удаляется с поверхности, а хлоридные загрязнения остаются, то коррозия протекает очень быстро.

Безотказность соединений во многом определяется пористостью, обусловленной в основном испарением летучих фракций из МПП в процессе пайки. Аналогичные явления могут иметь место и в условиях эксплуатации из-за испарения накопленной МПП влаги при повышенных температурах.

Интенсивность отказов позволяет количественно оценить надежность паяных соединений и показывает, какая доля от работающих в период времени t паяных соединений выходит из строя в единицу времени после периода t : $\lambda(t)=f(t)/P(t)$, где $f(t)$ – плотность вероятности времени безотказной работы; $P(t)$ – вероятность

безотказной работы. За критерий отказа при испытаниях на надежность принимается полный обрыв соединения или увеличения падения напряжения на нем на один порядок. Примерный временной график (рис. 13.17) проведения испытаний паяных соединений на надежность включает термоциклирование от -60 до 80°C с длительностью цикла 1 ч 1, нормальные условия 2, нагрев до 80°C , выдержку в атмосфере тропической влажности 3, 98%-ная относительная влажность и 40°C 4.

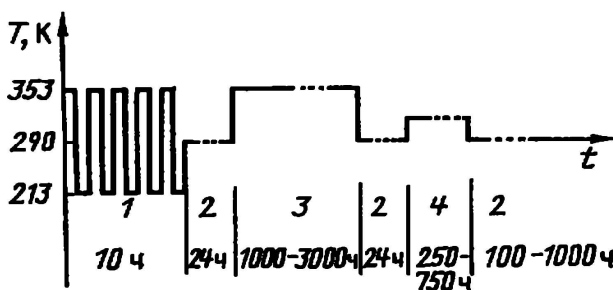


Рис. 13.17. Временной график испытаний паяных соединений на надежность

Количественно безотказность соединений оценивают интенсивностью отказов—числом отказавших соединений в единицу времени, отнесенным к числу соединений, непрерывно работающих к началу рассматриваемого промежутка времени [444]:

$$\lambda_i(t) = \frac{\Delta n_i}{(N - n)\Delta t_i}, \quad (13.7)$$

где Δn_i —число отказавших соединений за промежуток времени Δt_i , n_i —число соединений, отказавших к началу промежутка времени, N —общее число соединений.

К настоящему времени наиболее полно разработаны вероятностно-статистические методы оценки надежности. Разработаны и стандартизованы методы расчета надежности, которые базируются на представлении анализируемых устройств как совокупности большого числа независимых элементов с постоянными в процессе эксплуатации λ -характеристиками. Сегодня в технические условия на элементы обязательно вводятся требования по статистическим показателям надежности и соответствующим им методам и объемам испытаний. И не случайно к категории надежности в настоящее время причисляют

не только безотказность, но и долговечность, сохраняемость и ремонтпригодность.

Однако по мере роста надежности элементов, процессы, определяющие данный параметр посредством соответствующих испытаний, становятся неэффективными. Исходя из принципа равнопрочности элементов совокупности, представляющей ИЭ, возможность восстановления работоспособности монтажа в случае его отказа, полагая, что надежность элементной базы улучшается в 10 раз каждые 10 лет, абсолютное число элементов монтажа растет, а их размер уменьшается пропорционально растущей плотности компоновки элементов, интенсивность отказов элементов печатного монтажа распределяется следующим образом (табл. 13.3) [445]. Повышенную надежность имеют соединения, выполненные на автоматах с программным управлением профиля нагрева и применением нейтральной среды (азота) для предотвращения образования оксидов на активированных поверхностях.

Таблица 13.3

Надежность контактных соединений

Виды соединений	Интенсивность отказов, 1/ч
Пайка вручную	$1,00 \cdot 10^{-9}$
Пайка на автоматах	$1,00 \cdot 10^{-12}$
Пайка в нейтральной среде	$1,00 \cdot 10^{-13}$
Контакты соединений	$1,00 \cdot 10^{-8}$
Концевые печатные контакты	$1,00 \cdot 10^{-6}$
Двусторонние ПП	$1,00 \cdot 10^{-7}$
Многослойные ПП	$1,00 \cdot 10^{-6}$
В том числе	
элементы изоляции	$10,00 \cdot 10^{-11}$
элементы соединений	$4,00 \cdot 10^{-9}$

Подтверждение испытаниями таких показателей надежности за приемлемый интервал времени — процесс чрезвычайно трудоемкий и убыточный, так как требует вовлечения в эксперимент огромного количества образцов изделий. Так, для подтверждения с 95%-ной доверительной вероятностью интенсивности отказов 10^{-7} ч^{-1} требуется испытать 1000 образцов в течение 10 лет. Для уменьшения времени испытаний до 1000 ч (1,5 месяца) необходимо увеличить объем выборки до 100 тыс. шт., что неэкономично и практически

невозможно. Ускоряющими факторами испытаний могут быть повышенная температура и повышенное напряжение [446]. При повышенной температуре ускоряются процессы электромиграции, окисления, образования интерметаллических соединений и коррозии, а при повышенном напряжении—электромиграция, образование дефектов в прилегающих полупроводниковых и изоляционных слоях [447].

В общем случае, для многих полупроводниковых приборов и ИМС, долговечность согласно закону Аррениуса описывается логнормальным распределением:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{\left(\frac{Lnt - \mu}{\sigma} \right)^2}{2} \right], \quad (13.8)$$

где: t - время испытаний, μ - логарифм срока службы, σ - среднеквадратическое отклонение срока службы.

Параметр μ имеет нормальное распределение и является линейной функцией нагрузки: $\mu = \alpha + \beta T^{-1}$, где α , β – параметры, характеризующие особенности ИМС и зависит от условий эксплуатации или режимов испытаний. Специалисты фирмы Analog Devices считают, что 1000 час испытаний в режиме 125°C эквивалентно 10 годам испытаний в режиме 55°C. Термо– и электротренировка ускоряют процессы старения соединений и предназначены для выявления ранних отказов [448].

Исследования термомеханических свойств соединений, выполненных различными припоями, показали, что при небольших напряжениях (до 15 МПа) скорость ползучести бессвинцовых припоев меньше, чем свинцово–содержащих. При более высоких напряжениях наблюдается обратная картина. В связи с этим крупные компоненты с соответствующими большими различиями в тепловом расширении более критичны при использовании бессвинцовых припоев [449].

Для повышения надежности паяных соединений в ИЭ необходимо обеспечить хорошее смачивание припоем выводов, конструкция соединения должна быть рассчитана на отсутствие постоянного усилия (более 1 Н), прилагаемого к выводам, в соединении не должно быть недостатка припоя, покрытие контактных площадок платы должно защищать от диффузии медной основы [450]. Дополнительными мерами обеспечения надежности паяных соединений являются: контроль состава припоя через каждые 10 часов работы, защита поверхности припоя в ванне нагревостойкой жидкостью, выбор температуры пайки

на уровне 20°C выше температуры плавления припоя, применение бесканифольных водосмываемых флюсов [451].

В последние годы заново востребованы и развиты модели усталостных разрушений применительно к оценке надежности бессвинцовых паяных соединений. В Европе развернуты широкие экспериментальные исследования, чтобы предсказать последствия перехода на бессвинцовые технологии паяк. Главным источником информации для оценки надежности послужила устойчивость соединений к воздействию термоциклов, провоцирующих термомеханические усталостные разрушения. Несмотря на хорошую повторяемость этих экспериментов, признавать за ними окончательный вердикт никто не решает. Необходимо наполнение известных и хорошо отработанных моделей разрушения новыми реологическими характеристиками новых припоев, чтобы использовать их для предсказания надежности бессвинцовых соединений в широком диапазоне их применения.

Для количественного сравнения долговременной устойчивости бессвинцовых паяных соединений использована модель малоцикловых усталостных разрушений Коффина–Мэнсона. Исходя из амплитуд пластических деформаций под действием напряжений в направлении разрушений, оценивается среднее количество циклов до разрушения:

$$N_f = 0,25(\varepsilon_e / \varepsilon_n)^2, \quad (13.9)$$

где ε_e – остаточная деформация при разрыве, ε_n – максимальная пластическая деформация.

Наравне с этим критерием устойчивости паяных соединений к циклическим нагрузкам может использоваться энергия ползучести при деформации в направлении разрушения:

$$N_f = 0,25(\Delta W_u)^2, \quad (13.10)$$

где ΔW_u – максимальная энергия пластической деформации, приходящаяся на цикл нагрузки.

Для анализа малоцикловой усталости конструкций с ограниченными усталостными ресурсами (несколько сотен циклов) были использованы результаты испытаний модуля с флип–чипом на плате без заливки компаундом. Флип–чип на керамической основе имел два периферийных ряда шариковых выводов с шагом 0,45 мм. Под основаниями шариковых выводов химически осаждался никель NiP. Кристалл

размером 6,7х6,7 мм смонтирован на монтажной подложке из материала FR4 с паяльной маской. Покрытие монтажной подложки под пайку — никель-золото по меди [452].

Испытания проводились на устойчивость к термоциклам «воздух-воздух» при трех температурных диапазонах: $-50/+20^{\circ}\text{C}$, $0/+70^{\circ}\text{C}$ и $+50/+120^{\circ}\text{C}$. Частота смены циклов: 30 мин на цикл с фиксацией на предельных температурах по 10 мин и сменой температур в течение 5 мин. Увеличение усталостной прочности (до 1000 и более циклов) было достигнуто за счет заполнения пространства между кристаллом и монтажной подложкой твердеющим компаундом. Наложения двух механизмов отказов: тепловое расширение компаунда и усталостные разрушения паяных соединений — обусловили сложность в анализе результатов испытаний. Тем не менее, по данным металлографического анализа, доминирующей причиной отказа явились усталостные разрушения соединений.

Инженерное обеспечение современного производства изделий электроники, гарантирующее воспроизводство высоких норм проектирования, надежность изделий и низкий уровень брака, в настоящее время не может обойтись без сертификации системы качества в соответствии с требованиями ИСО 9000. Эта система охватывает все стороны деятельности, начиная от входного контроля материалов и комплектующих, аттестации технологических процессов и оборудования, анализа дефектов и отказов, испытания изделий [453]. Успешная сертификация системы качества изделий – главное условие преимущества изделия на рынке и гарантия его надежности.

Глава 14. ПРИМЕНЕНИЕ ИОННЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ГРАНИЦ ”МЕТАЛЛ– АРСЕНИД ГАЛЛИЯ”

14.1. Ионно-лучевой синтез контактов с барьером Шоттки на арсениде галлия

Метод нанесения материала контакта с барьером Шоттки сильно влияет на характеристики получаемых контактов. Это объясняется тем, что закрепление уровня Ферми на поверхности полупроводника зависит от плотности поверхностных состояний, которая определяется условиями конденсации первых монослоев металла. Условия конденсации зависят прежде всего от метода нанесения. Существующие методы нанесения контактных слоев на полупроводник по степени их влияния на свойства поверхности полупроводника можно разделить на две группы [454].

К первой группе относятся методы, при использовании которых нанесение металла не изменяет существенно свойств поверхности. Это прежде всего термическое испарение металла на холодную подложку. Ко второй группе относятся химическое и электрохимическое осаждение, осаждение из газовой фазы, путем восстановления газообразного соединения металла водородом, все виды ионного распыления. Наиболее широко используемыми методами для нанесения однокомпонентных пленок являются резистивное испарение, электроннолучевое испарение и ионное распыление.

Для первой группы методы отличаются способом получения потока металла, условиями переноса металла к полупроводнику и конденсации. Так, при резистивном термическом испарении создается поток частиц металла без ионизации в вакууме. Диапазон значений энергии частиц $0,01-1,0$ эВ. При испарении лазерным или электронным лучом эмитируются как атомы, так электроны и ионы, причем степень ионизации зависит от удельной мощности луча. Увеличение доли ионов приводит к ухудшению контактов [455]. Кроме того повреждения поверхности арсенида галлия может происходить из-за облучения электронами и протонами [456]. Отметим также, что при электронно-лучевом испарении возникает мягкое рентгеновское излучение, влияющее на процесс конденсации и рост пленки металла, а также на свойства приповерхностного слоя полупроводника. К недостаткам первой группы методов следует отнести низкую адгезию слоев металла к полупроводнику, сложность испарения металлоподобных химических

соединений и сплавов. Адгезию металлов можно увеличить, используя испарение с одновременной бомбардировкой наносимой пленки ионами аргона с энергией 300 эВ [457].

Из второй группы методов лишь молекулярно-лучевая эпитаксия позволяет сформировать контакты Шоттки с хорошими характеристиками ($\phi_b=0,79$, $n=1,04$) [458]. Методы, основанные на использовании ионов, не дают возможности получить приемлемые параметры контактов без последующего высокотемпературного отжига. Так использование диодного, ВЧ диодного и магнетронного распыления приводит к повреждению поверхности арсенида галлия. Так в процессе магнетронного распыления могут образовываться нейтральные атомы с энергиями около 100 эВ в результате отражения и нейтрализации ионов, бомбардирующей мишень [459]. При этом в полупроводнике образуется дефектный слой с повышенной концентрацией доноров толщиной 100–200 нм [460]. ВЧ диодное распыление также вносит повреждения в форме вакансий или центров захвата в запрещенной зоне арсенида галлия, что приводит к ухудшению электрофизических и шумовых характеристик контакта с барьером Шоттки [461]. Контакты полученные по такой технологии, обычно имеют $\phi_b=0,52-0,76$ эВ, $n=1,05-2,4$ и для устранения дефектов необходим отжиг при температуре 400–500°C.

Одним из перспективных методов формирования слоев токопроводящих систем с барьером Шоттки является ионно-лучевое распыление. Это объясняется преимуществами этого метода перед другими, использующими распыление мишени ионами: пространственное разделение областей генерации плазмы и области непосредственной конденсации материала, более высокая чистота пленок из-за низких давлений рабочего газа, высокая адгезия, минимальное воздействие вторичных электронов на подложку, а, следовательно, уменьшение нагрева и степени радиационных повреждений, отсутствие ускоряющего потенциала на мишени, возможность распыления любых материалов [462].

Авторы работ [463,464] исследовали влияние процесса распыления ионным лучом на характеристики диодов Шоттки. Установлено, что при ускоряющих напряжениях свыше 100–500 В в приповерхностном слое арсенида галлия толщиной 10 нм образуется высокая концентрация дефектов кристаллической структуры. Алогичные дефекты образовывались на поверхности границы раздела Au/GaAs в процессе ионного распыления металла [465]. Воздействие ионов ведет к уменьшению высоты барьера и к увеличению коэффициента

идеальности. При увеличении ускоряющего напряжения вместо монотонного уменьшения Φ_v наблюдается кривая с небольшим максимумом. Результаты микроанализа указывали на повышенную концентрацию мышьяка в приповерхностном слое арсенида галлия толщиной $\sim 0,3$ мкм.

14.2. Исследование характеристик потоков нейтральных и заряженных частиц в области подложки при ионно-лучевом распылении

При бомбардировке твердого тела ускоренными ионами с энергией, превышающей энергию распыления, на поверхности твердого тела происходит ряд процессов упругого и неупругого взаимодействия: электронно-ионная эмиссия, нейтрализация положительных ионов при столкновении с поверхностью твердого тела и с образованием электронов, возникновение отрицательных ионов при столкновении положительных ионов с поверхностью металла, отражение первичных положительных ионов.

У иона, сталкивающегося с поверхностью, имеется большой выбор в конечном исходе процессе столкновения. Вероятность каждого из вышеуказанных процессов сложным образом зависит от свойств первичного иона (масса, энергия, величина заряда), угла столкновения с поверхностью, характеристик мишени.

Ионно-лучевое распыление выгодно отличается от других разновидностей методов ионного распыления пространственным разделением областей генерации плазмы и конденсации распыленного материала. Однако в области подложки всегда имеется наличие некоторого количества заряженных частиц, т.е. электронов и ионов. Потоки этих частиц могут существенно изменять характеристики формируемых тонкопленочных покрытий, а в случае напыления на полупроводниковую подложку, внести нарушения в приповерхностный слой полупроводника. Поэтому важно исследовать характеристики этих потоков при варьировании режимов распыления мишеней из различных материалов.

Исследовалось ионно-лучевое распыление алюминия при варьировании токов на мишени, ускоряющего напряжения. При этом производились изменения тока и напряжения на подложке, которая была изолирована от корпуса. Схема эксперимента представлена на рис.14.1. Остаточный вакуум в процессе распыления был не хуже $1,33 \cdot 10^{-2}$ Па, давление рабочего газа составляло от $3,325 \cdot 10^{-2}$ до

$6,65 \cdot 10^{-2}$ Па. Перед проведением измерений тока и напряжения на подложке, которая представляла собой диск из нержавеющей стали диаметром 50мм мишень тренировалась в течение 10 мин.

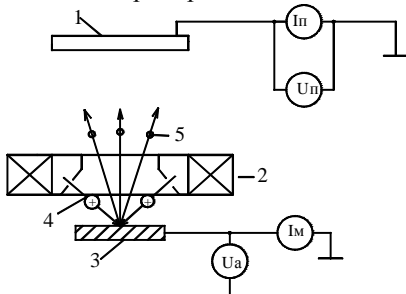


Рис.14.1. Схема исследования потоков заряженных частиц в область подложки при ИЛР: 1 – подложка, 2 – ионный источник, 3 – мишень, 4 – пучки первичных ионов, 5 – поток вещества

На рис.14.2 приведены зависимости тока и напряжения на подложке в зависимости от тока мишени и ускоряющего напряжения.

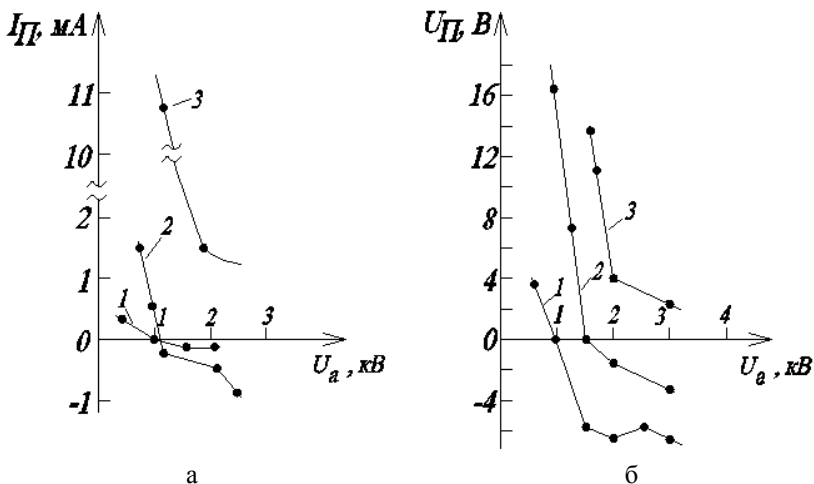


Рис.14.2. Зависимость тока заряженных частиц (а) и потенциала подложки (б) в зависимости от тока мишени и ускоряющего напряжения: 1 – $I_m = 5$ мА, 2 – $I_m = 30$ мА, 3 – $I_m = 60$ мА

Анализ результатов приводит к следующим заключениям [466,467]:

1) Подложка облучается потоком положительных, нейтральных и отрицательных частиц. Источниками положительных частиц являются отраженные от поверхности мишени ионы аргона, ионы распыленных атомов мишени, ионы, экстрагируемые из положительного пучка. Вторичная электронная эмиссия, ионы аргона и распыляемого материала – это источники отрицательных частиц.

2) При распылении мишени ионами, сформированными при невысоких ускоряющих напряжениях (0,5–2,0 кВ) наблюдается преобладание потоков положительных частиц. Основным источником ионов в этом случае – первичный пучок, т.к. разряд при малых U_a близок к магнетронному распылению.

3) При увеличении U_a для всех токов мишени наблюдается уменьшение суммарного тока частиц и положительного потенциала на подложке. Это можно объяснить устранением условий для возникновения магнетронного разряда, а также значительной вторичной эмиссией электронов из мишени за счет увеличения кинетической энергии первичных ионов. Наряду с этим процессом будет увеличиваться и число ионов аргона, отраженных от мишени, однако увеличение тока отрицательных частиц свидетельствует о том, что коэффициент вторичной эмиссии превышает коэффициент отраженных первичных ионов.

4) Уменьшение расстояния мишень–подложка значительно изменяет соотношение потоков отрицательных и положительных частиц, только при токе мишени $I_m = 60$ мА.

5) Уменьшение величины магнитного поля в зазоре изменяет соотношение положительных и отрицательных частиц при $U_a > 2$ кВ.

Измерение энергии частиц, попадающих на подложку, проводилось с использованием многосеточного зонда. Схема проведения экспериментов приведена на рис.14.3. В качестве мишени использовался алюминий. Энергия частиц определялась путем дифференцирования тормозных характеристик. На рис. 14.4 и 14.5 приведены тормозные характеристики и зависимости энергии частиц в области подложки от ускоряющего напряжения. Анализ зависимостей показывает, что энергия частиц составила 20–40 эВ.

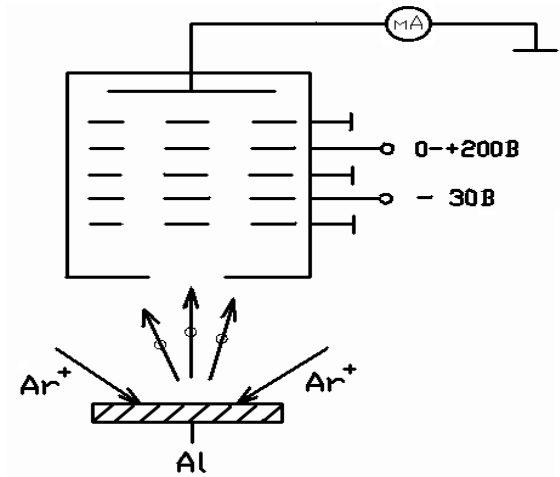


Рис.14.3. Схема эксперимента по определению энергии частиц

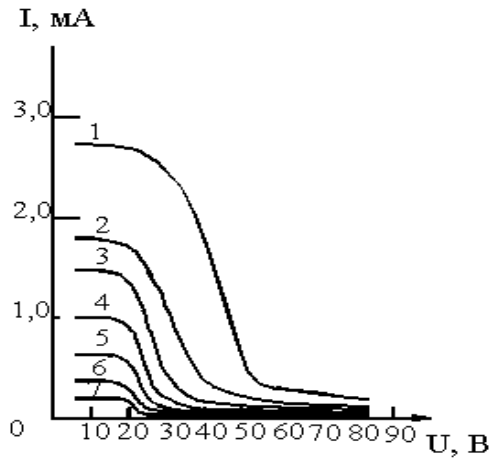


Рис. 14.4 . Тормозные характеристики:

- 1- $U_{a-} = 4$ кВ , $I_M = 60$ мА , 2- $U_{a-} = 3,5$ кВ, $I_M = 50$ мА, 3- $U_{a-} = 3,0$ кВ, $I_M = 40$ мА , 4- $U_{a-} = 2,5$ кВ , $I_M = 35$ мА , 5- $U_{a-} = 2,0$ кВ , $I_M = 20$ мА
6- $U_{a-} = 1,5$ кВ , $I_M = 15$ мА , 7- $U_{a-} = 1,0$ кВ , $I_M = 9$ мА

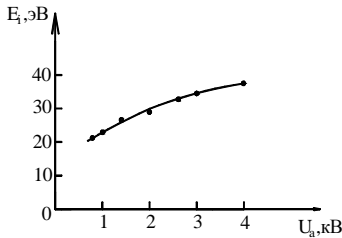


Рис. 14.5 . Зависимость энергии частиц от ускоряющего напряжения

14.3. Исследование эмиссионных спектров излучения плазмы при распылении металла

Эмиссионные спектры снимались с целью определения рода и химического состава частиц, попадающих на подложку. Для измерения спектров использовалась стандартная система, состоящая из кварцевого гибкого световода, монохроматора, фотоэлектронного усилителя ФЭУ-106 и самописца КСП-4. Проведены исследования потоков распыленного материала мишени из алюминия в области подложки. Регистрация спектров излучения осуществлялась при следующих токах коллектора, который находился в области подложки: $-0,03$; 0 ; $2,3$ и $4,2$ мА. Наблюдалось увеличение интенсивности линий Al ($3960, 0$) и Al ($3938,0$) с $0,25$ до $1,0$ и с $0,17$ до $1,0$ соответственно, что может быть связано с изменением тока мишени с 33 до 78 мА.

Почти аналогично происходило и увеличение высоты пиков атомарного аргона ArI ($4198,32$) и ArI($4158,59$): с $0,08$ до $1,0$ и с $0,02$ до $1,0$ соответственно. При $I_n \geq 2,3$ мА были также обнаружены линии ионов аргона Ar^+ ($4348,06$), а при $I_n \geq 4,2$ мА появились линии Ar^+ ($4879,87$), Ar^{2+} ($4610,0$), ArI($4424,0$), Ar^+ ($4339,36$), а также следы железа FeI($3558,0$). Наличие последнего можно объяснить распылением полюсных наконечников катодного узла ионного источника, т.к. при данном токе подложки разряд был близок по своим параметрам к магнетронному [468].

На рис.14.6 приведены спектры плазмы при токе подложки $4,2$ мА.

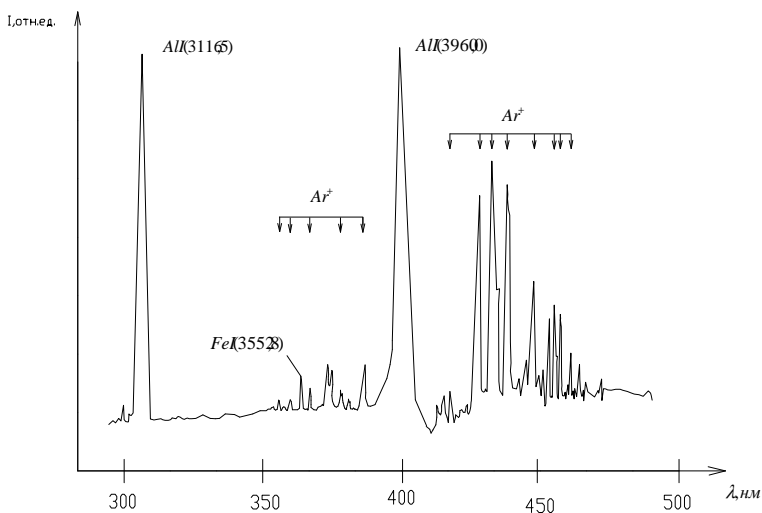


Рис.14.6. Эмиссионный спектр плазмы в области подложки при распылении алюминия

Таким образом, при ионно-лучевом распылении металлических мишеней в области подложки формируется поток атомов распыляемой мишени и ионов инертного газа, которые будут воздействовать на поверхность арсенида галлия и растущей металлической пленки и, соответственно, существенно влиять на характеристики формируемых контактов, т.к. эти потоки имеют достаточную энергию и плотность.

14.4. Влияние режимов ионно-лучевого распыления на характеристики контактов с барьером Шоттки на арсениде галлия

Для проведения исследований влияния режимов ионного распыления на параметры контактов использовались тестовые образцы, представляющие собой структуры полевых транзисторов с барьером Шоттки. В качестве материала контактов применялся алюминий. Конфигурацию контактов получали взрывной фотолитографией. Перед нанесением металла поверхность полупроводника освежалась в аммиачно-перекисном травителе и промывалась дистиллированной водой.

На рис. 14.7 и 14.8 представлены зависимости высоты барьера ϕ_B , коэффициента идеальности n и пробивного напряжения $U_{пр}$ от режимов распыления [469].

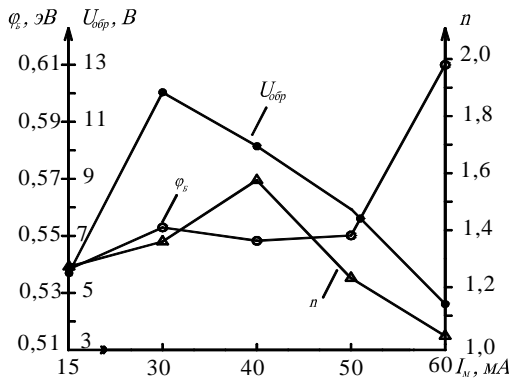


Рис.14.7. Зависимость характеристик контактов от тока мишени

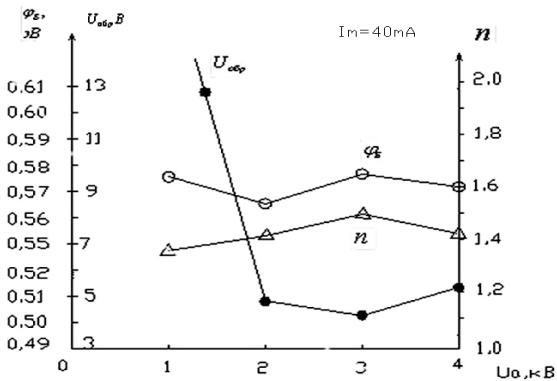


Рис. 14.8. Зависимость характеристик контактов от ускоряющего напряжения

Установлено, что энергия распыляющих ионов несущественно влияла на высоту барьера ϕ_B и коэффициент идеальности n контактов. Пробивное обратное напряжение уменьшалось с 16 до 4 В при увеличении ускоряющего напряжения с 1,5 до 3,0 кВ (рис.14.8). Воспроизводимость высоты барьера по площади пластины составила 30–40 мэВ и почти не зависела от U_a (рис.14.9). В отличие от энергии

ионов (ускоряющего напряжения), ток на мишени при распылении алюминия оказывает значительное воздействие на характеристики контактов к арсениду галлия [470].

Наблюдалось ухудшение параметров (уменьшение φ_B и увеличение n) при токах меньших 15–30 мА и больших 5–60 мА (рис.14.7). Предполагается, что в случаях малых токов мишени плохие параметры могут быть обусловлены загрязнением пленки алюминия газами остаточной атмосферы. При $I_M > 50$ мА плотность потока заряженных частиц в области подложки составляет около $0,3-0,5$ мА/см², что вызывает значительные повреждения в приповерхностной области арсенида галлия и приводит к снижению высоты барьера до 0,515 эВ и увеличением n до 1,9. Поэтому оптимальный ток мишени должен быть в диапазоне 40–45 мА. Обнаружено повышение воспроизводимости высоты с ростом тока мишени. Так увеличение I_M с 30 до 60 мА приводит к снижению разброса φ_B с 50 до 3 мэВ. Это, по-видимому, связано с увеличением степени облучения подложки положительно заряженными частицами (рис. 14.10)

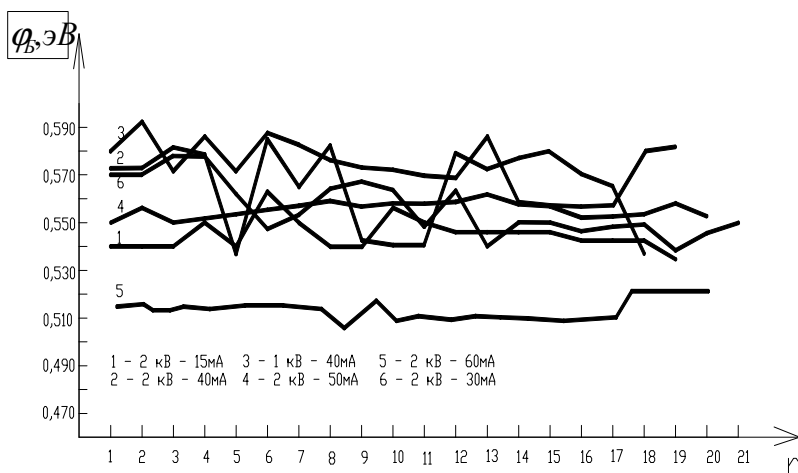


Рис.14.9. Влияние тока на мишени на воспроизводимость высоты барьера по пластине (n - номер контакта)

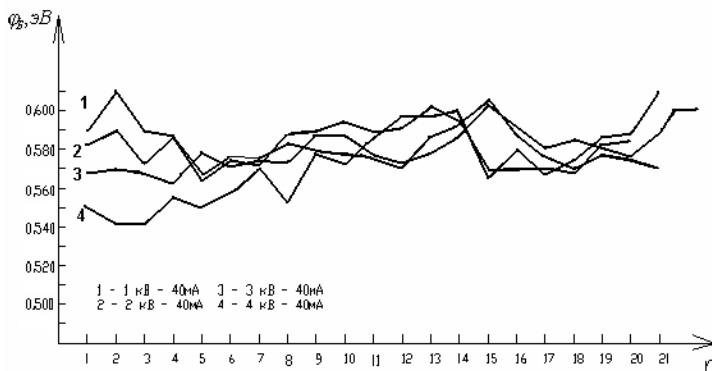


Рис. 14.10. Влияние ускоряющего напряжения на воспроизводимость высоты барьера по пластине

14.5. Влияние ионной очистки поверхности арсенида галлия и ионной бомбардировки растущей пленки на характеристики контактов с барьером Шоттки

Основная тенденция развития электронной техники – повышение качества, надежности изделий и стремление к все большей миниатюризации полупроводниковых приборов и интегральных схем. Состояние поверхности полупроводниковой подложки в значительной мере определяет качество изготавливаемых приборов, их долговечность и надежность. В технологии интегральных схем и полупроводниковых приборов на арсениде галлия операции очистки поверхности полупроводника приобретают особенно важное значение. К ним предъявляются более жесткие требования по сравнению с кремниевой технологией. Это можно объяснить следующими причинами:

- необходимостью нанесения маскирующих, изолирующих, пассивирующих, защитных диэлектрических покрытий из-за отсутствия промышленной технологии выращивания высококачественного собственного окисла арсенида галлия;

- преимущественным применением в качестве активных элементов диодов с барьером Шоттки, т.е. приборов, использующих контакт металл-полупроводник, в которых состояние поверхности GaAs перед нанесением металла оказывает влияние на параметры этих приборов;

- разработкой приборов на основе гетеропереходов, для формирования которых используются различные виды эпитаксиального

наращивания (ГФЭ, ЖФЭ, МЛЭ) тонких ($<0,01$ мкм) многослойных структур;

- разработкой МДП–приборов на арсениде галлия, использующих в основном нанесенные слои для подзатворного диэлектрика;

- сложностью формирования высококачественных, стабильных и надежных омических контактов, сильной зависимостью их электрических и эксплуатационных характеристик от состояния поверхности арсенида галлия перед нанесением материала контакта.

При разработке технологии очистки GaAs необходимо учитывать такие особенности этого материала, как испарение мышьяка при температурах выше 450°C и нарушение стехиометрии поверхности при различных технологических обработках. Арсенид–галлиевая технология использует различные виды очисток поверхности: традиционную жидкостную химическую обработку для предварительной и финишной очистки, нагрев в сверхвысоком вакууме, различные виды очисток с использованием ускоренных ионов (ионная, в тлеющем разряде, плазмохимическая). Правильный выбор и использование того или иного вида очистки является сложной задачей, требующей тщательного анализа физико-химических процессов, протекающих в гетерогенных системах жидкость/GaAs, газ/GaAs, плазма/GaAs.

Ионная очистка поверхности полупроводниковых подложек является наиболее приемлемой. Этот процесс включает формирование автономного ионного пучка и бомбардировки подложки. Бомбардировка подложек ионами инертных газов вызывает распыление поверхностных слоев вместе с окислами, остаточными загрязнениями и адсорбированными газами. Это единственный метод очистки, позволяющий эффективно удалять с поверхности углерод [471].

Обычно для очистки применяют ионы аргона, хотя используется и другой инертный газ криптон, более тяжелый чем Ar. В работе [472] предложено использовать для очистки азот. Хотя отношение атомных масс азота и аргона составляет около 3,5, коэффициенты распыления ионами этих газов различаются незначительно ($S_{\text{N}}/S_{\text{Ar}}=0,61$). Применение ионов азота энергией 300 эВ позволяет получать поверхность арсенида галлия с незначительными радиационными повреждениями. Также минимальное нарушение поверхности происходит при использовании ионной очистки Ar атмосфере хлора. Возникающие при этом дефекты отжигаются даже при 300° . Используется также и реактивное ионное травление в CF_4 и CHF_3 для очистки поверхности GaAs.

Для успешного применения ионной очистки важно знать какие процессы происходят при взаимодействии ускоренных ионов со сложным полупроводником, а также воздействие отжига после ионной бомбардировки. Наиболее широко ионная очистка применяется в технологических процессах формирования невыпрямляющих контактов с барьером Шоттки. Это связано с повышенными требованиями к границе раздела металл/арсенид галлия, т.к. ее состояние и определяет характеристики контакта. Накоплен большой зарубежный и отечественный опыт в данном вопросе, имеется большое количество работ. Так, исследовано влияние режимов очистки на высоту барьера и коэффициент идеальности контактов Au/n-GaAs [473]. Результаты экспериментов приведены в табл. 14.1.

Таблица 14.1.

Электрофизические характеристики контакта Au/n-GaAs

Вид очистки	ϕ_b , эВ	n
без очистки	0,78	1,97
химическая очистка	0,89	1,04
ионная, E=1 кэВ	0,60	1,96
ионная, E=3 кэВ	0,69	1,54
ионная, E=5 кэВ	0,65	3,92

После ионной очистки происходит уменьшение высоты барьера, но это уменьшение не монотонное, т.к. имеется небольшой максимум, соответствующий энергии ионов 3 кэВ. При этой энергии происходит и уменьшение коэффициента идеальности. Ухудшение характеристик контакта вызывается нарушением структуры и состава поверхности. Т.к. вакансии мышьяка действуют как доноры, то происходит увеличение концентрации носителей; при этом снижается время их жизни и подвижности. Токовый перенос в контакте осуществляется посредством туннелирования электронов через сниженный в результате вышеуказанных процессов потенциальный барьер.

Главное преимущество применения ионной очистки – это существенное увеличение воспроизводимости параметров контактов, в частности ϕ_b . В работе [474] было проведено исследование ионной очистки на воспроизводимость высоты барьера по пластине контакта Au/Ti/n-GaAs. Использовалось ВЧ травление поверхности арсенида галлия при мощности генератора 20–200 Вт в течение 4–27 мин. Диоды, изготовленные на травленной распылением поверхности GaAs с последующей термообработкой, при 350°C обладали хорошей

воспроизводимостью. Разброс в значениях ϕ_b не превышал 10 мэВ, в то же время без ионной очистки – 25 мэВ.

Свойства границы раздела металл-арсенид галлия и, следовательно, характеристики контакта Шоттки сильно зависят от метода формирования пленки металла, прежде всего от энергии конденсирующихся атомов металла. Введение дополнительной энергии в зону конденсации за счет ионной бомбардировки растущей металлической пленки может существенно изменить параметры контакта. В общем случае при воздействии потока ионов на растущую пленку могут иметь место такие процессы как повышение энергии атомов, увеличение интенсивности десорбции, распыление инородных включений, внедрение ионов в пленку и подложку, активация поверхности, повышение химической активности атомов материала пленки, образование дефектов и электрически заряженных центров в полупроводнике, радиационно-стимулированная диффузия атомов металла в арсениде галлия. Эти процессы увеличивают адгезию пленки металла к арсениду галлия, снижают уровень загрязнения в пленке и уменьшают удельное сопротивление последней, увеличивают плотность покрытия. Важным эффектом ионной бомбардировки является образование псевдоаморфной границы раздела металл-полупроводник за счет радиационно-стимулированной диффузии, что может существенно изменить характеристики контакта Шоттки.

Исследование влияния режимов ионной очистки на параметры контактов с барьером Шоттки проводилось с использованием контактной системы Al/TiB₂/n-GaAs. Слои наносились с использованием ионно-лучевого распыления. Контакты размером 0,3 x 0,2 мм² формировались с использованием обратной фотолитографии. Толщина пленки диборида титана составляла 150 нм, алюминия – 200–300 нм. Поверхность полупроводника перед нанесением контактов очищалась с использованием аммиачно-перекисного травителя. Часть образцов дополнительно очищалась с использованием бомбардировки ионами аргона. В качестве источника ионов применялся ускоритель с анодным слоем. Установлено, что высота барьера ϕ_b уменьшалась при использовании ионной очистки, причем снижение происходит не монотонно, при $U_0 = 2$ кВ наблюдается небольшой максимум (рис.14.11). Ионная очистка не обеспечивает и приемлемого значения коэффициента неидеальности. Минимальное значение n достигается при ускоряющем напряжении 0,5 кВ. Обратное напряжение (измерялось на уровне 10 мкА) контактов изменяется аналогично ϕ_b (рис.14.12). Как видно из зависимости высоты барьера от плотности ионного тока

очистки, ϕ_b значительно уменьшается при больших плотностях тока (рис.14.13). Это можно объяснить более высокой степенью аморфизации приповерхностного слоя арсенида галлия, увеличением концентрации ловушек и донорных центров.

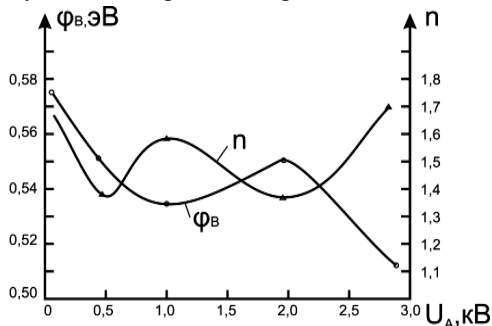


Рис.14.11. Влияние напряжения на аноде при ионной очистке на высоту барьера и коэффициент не идеальности контактов

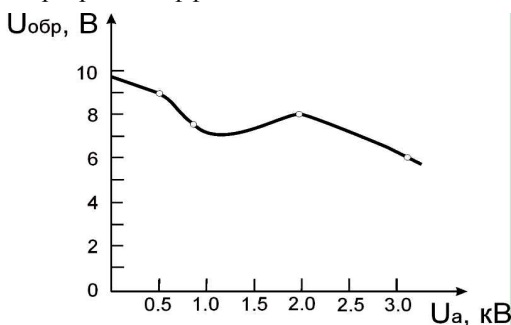


Рис.14.12. Влияние напряжения на аноде при ионной очистке на величину обратного напряжения контактов

Термообработка контактов осуществлялась в вакууме при 300–900°С в течение 30 мин. На рис. 14.14 приведены зависимости ϕ_b и n от температуры отжига. Наблюдается рост высоты барьера и соответственное уменьшение коэффициента не идеальности вплоть до 800°С. Это свидетельствует об уменьшении концентрации дефектов, упорядочении границы раздела. Происходит также диффузия мышьяка к поверхности и восстановление нарушенной стехиометрии GaAs. Нагрев выше 800°С ухудшает характеристики контакта. Это можно объяснить диффузией лигатуры (Te) из подложки в эпитаксиальную пленку.

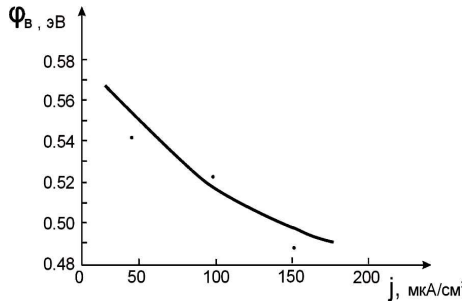


Рис.14.13. Зависимость высоты барьера контактов от плотности тока при ионной очистке

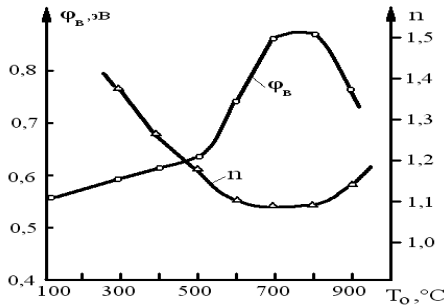


Рис.14.14. Влияние температуры отжига на характеристики контакта

Ионная очистка позволила значительно повысить воспроизводимость контактов по сравнению с химической. На рис.14.15 приведены гистограммы распределения Φ_B для этих методов очистки. Т.о. ионная очистка с последующей термообработкой может успешно применяться для изготовления воспроизводимых контактов с барьером Шоттки [475].

Проводилось исследование влияния режимов чередующего ионного покрытия на параметры контакта Ni/n-GaAs/. При этом потоки ионов аргона поступали на подложку периодически до начала и по окончании цикла осаждения. Перед процессом проводилась ионная очистка поверхности арсенида галлия. Результаты экспериментов представлены в табл. 14.2 и на рис. 14.15

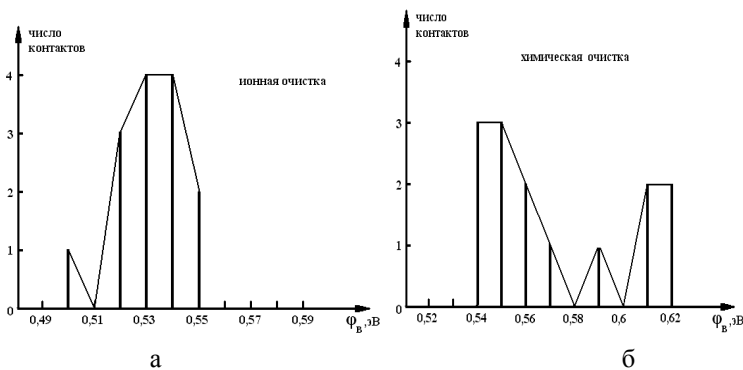


Рис.14.15. Влияние метода очистки на воспроизводимость контактов

Таблица 14.2.

Результаты исследований по влиянию ионной бомбардировки на параметры контактов с барьером Шоттки

Режимы ионной очистки		Режимы ионной бомбардировки		φ_B	n	$\Delta\varphi_B$
$U_0, кВ$	$I_0, мА$	$U_B, кВ$	$I_B, мкА$	эВ		мэВ
1,0	30	-	-	0,461	1,1	43
1,0	30	1,0	40	0,500	1,08	31
1,0	30	2,0	80	0,512	1,18	23
1,0	30	2,0	120	0,470	1,06	10
1,0	30	3,0	140	0,492	1,1	18

Анализ полученных результатов показывает, что ионная бомбардировка приводит к увеличению высоты барьера контакта по сравнению с ионной очисткой. В то же время влияние бомбардировки на коэффициент идеальности неоднозначно. Исследование воспроизводимости высоты барьера контактов, полученных методом чередующегося ионного покрытия, показало, что $\Delta\varphi_B$ зависит как от энергии, так и от дозы ионного потока [476]. Установлено, что ионная бомбардировка способствует уменьшению $\Delta\varphi_B$ (рис.14.16)

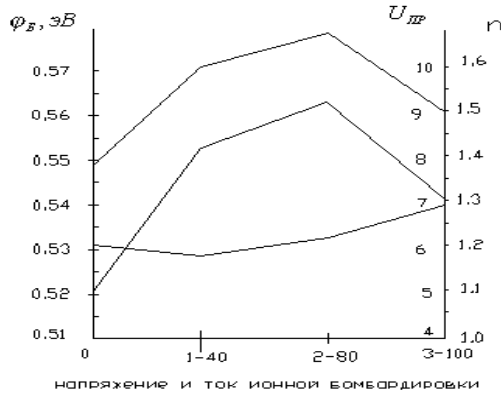


Рис. 14.16. Влияние ионной бомбардировки на параметры контакта

Измерение относительной толщины контактного слоя дало результат $1,48 \cdot 10^{-8}$ м (рис.14.17).

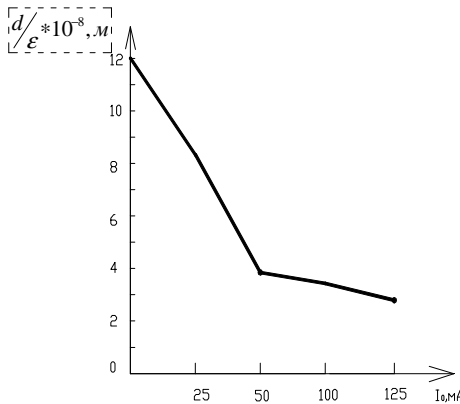


Рис.14.17. Влияние ионной очистки поверхности GaAs на относительную толщину переходного слоя

Таким образом, результаты исследований [477] показывают, что использование ионных методов способствует формированию контакта с малой толщиной переходного слоя и, как следствие, повышению воспроизводимости характеристик контактов.

Глава 15. ФОРМИРОВАНИЕ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТЯХ С АЛМАЗОПОДОБНОЙ СТРУКТУРОЙ ИОННО-ЛУЧЕВЫМ И МАГНЕТРОННЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ

15.1. Свойства покрытий, полученных ионно-лучевым и магнетронным распылением

Проблема рассеяния тепла является лимитирующей при конструировании изделий электронной техники (ИЭТ) повышенной мощности таких как мощные лазерные диоды, транзисторы, микропроцессоры, автомобильная и силовая электроника и т.п.

В процессах теплопередачи выделяют три принципиально различных элементарных способа распространения теплоты: за счет теплопроводности, теплового излучения и конвекции. Эти виды теплообмена в реальных условиях связаны между собой и проявляются одновременно. Однако максимальный вклад в процессы теплообмена в рабочих диапазонах (температура, давление) ИЭТ вносит такой параметр, как теплопроводность. Поэтому одним из возможных путей решения проблемы рассеяния тепла при конструировании ИЭТ является создание теплоотводов, обладающих высокими электроизоляционными свойствами и, вместе с тем, хорошей теплопроводностью.

Эту задачу можно решить двумя способами:

- на поверхность металла с высокой теплопроводностью наносят слой керамики, стекла или органического изолирующего вещества;
- используют керамические или кристаллические теплоотводы с высокой теплопроводностью.

Исходя из соображений надежности, в настоящее время основные усилия при проведении исследований и разработок сосредоточены на втором способе решения проблемы. До недавнего времени единственным материалом, обладающим достаточно высокой теплопроводностью и хорошими диэлектрическими свойствами, необходимыми при конструировании мощных полупроводниковых и вакуумных приборов, являлась окись бериллия (теплопроводность монокристаллической окиси бериллия достигает 370 Вт/м при 300 К). Однако развитие техники, в частности электронной, потребовало применения более широкого класса высокотеплопроводных материалов. Из известных в настоящее время материалов уникальной теплопроводностью обладают природные алмазы, превосходящие по этому параметру такой хороший проводник, как медь, в 2–6 раз [478].

Во всех случаях эффективность применения алмазных теплопроводящих оснований (АТО) напрямую зависит от качества металлизации граней и поверхностей алмаза. АТО применяются в тех случаях, когда ИЭТ выделяет такое количество теплоты, что теплопроводы, выполненные из традиционных материалов (например, медь, окись бериллия), не могут эффективно ее рассеивать, то есть можно говорить о том, что АТО применяются в экстремальных условиях. Такое положение дел предъявляет соответствующие требования к надежности металлизации АТО [479]. Повышенные требования к АТО приводят к необходимости тщательного выбора материалов, применяемых для создания слоев металлизации, а также разработке технологии нанесения последних. Число материалов, теоретически пригодных для создания слоев металлизации, довольно велико (табл. 15.1). Однако существует ряд требований, которые значительно сужают круг таких материалов.

Таблица 15.1.

Параметры материалов, применяемых для создания слоев металлизации

Материал	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Удельное объемное сопротивление, 10^{-6} Ом·см	ТКЛР, 10^{-6} К ⁻¹
Al	221	2,7	23,5
Cu	401	1,67	17
Ag	432	1,6	18,7
Mo	138	5,4	5,1
W	154	5,5	4,5
Au	310	2,3	14
Ta	45,2	13,5	7
Ti	22	4,2	18,1
Fe	74	10	16,7
Co	69,5	9,7	17,9
Ni	67	6,9	13,2
Pt	74	10,6	8,9
Pd	72	10,8	12,5

Среди подобных условий следует отметить требование к теплопроводности материала. Она должна быть возможно более высокой, чтобы не снижать общую теплопроводность АТО. То же требование предъявляется и к электропроводности материалов.

Удельное сопротивление должно быть по возможности минимальным, т.к. перенос тепла в АТО осуществляется как за счет фононного, так и электронного механизмов, высокое сопротивление идет в ущерб последнему из них. Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) должен быть максимально близок к ТКЛР алмаза $(9-15) \cdot 10^{-7} / \text{К}$. Выполнение этого условия предотвращает возникновение механических напряжений в напыленных пленках и способствует устранению эффектов, вызывающих отрыв (отслоение) их от алмазного основания.

Отдельные требования предъявляются к материалам, используемым для каждого конкретного слоя металлизации. Так материал адгезионного слоя должен обладать высоким сродством с углеродом и образовывать с ним соединения [480]. Специфические требования к проводящему слою состоят в необходимости обеспечения его хорошей паяемости при сборке.

К адгезионно-активным металлам относят титан, хром, цирконий, ниобий и тантал, которые поэтому и являются наиболее предпочтительными для создания адгезионных слоев металлизации. Адгезионная активность молибдена, вольфрама и никеля для использования в качестве компонентов мала. Тугоплавкие металлы молибден и вольфрам обладают низким сопротивлением, высокой теплопроводностью и небольшим ТКЛР. Однако тонкие пленки данных металлов имеют тенденцию отслаиваться и растрескиваться, что не обеспечивает требуемую величину адгезии. Титан, тантал, гафний имеют более высокое электрическое сопротивление и низкую теплопроводность, но обладают высокой адгезионной способностью и легко соединяются с углеродом. Таким образом, учитывая вышесказанное, следует отметить, что в качестве материала для адгезионного слоя целесообразно применять титан, тантал и гафний.

Наиболее оптимальные свойства проводящего слоя металлизации достигаются при использовании таких материалов как никель, медь и серебро, которые обладают достаточной тепло- и электропроводностью, а также хорошо смачиваются припоями. Однако медь и серебро имеют сильную склонность к окислению, поэтому их необходимо закрывать пленкой никеля. Кроме того, медь может эффективно диффундировать в слой припоя и дойти до активной полупроводниковой структуры. Для предотвращения этого следует использовать барьерный слой [481]. Таким образом, наиболее предпочтительным материалом для создания проводящего слоя металлизации является никель.

Формирование многослойных пленочных покрытий на поверхностях с алмазоподобной структурой связано с проблемами обеспечения прочных адгезионных связей покрытий, как с подложкой, так и между слоями металлизации, а также получение пленок с минимальным удельным сопротивлением и температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) и улучшенной микроструктурой [482,483]. Решить эти проблемы можно введением в зону конденсации дополнительной энергии или увеличением энергии конденсирующихся атомов. Проведенный анализ научно-технической литературы показал, что для формирования многослойных покрытий целесообразно использовать термоионное испарение [484] осаждение из плазмы разряда (так называемый метод КИБ–конденсации) [485] метод ионного покрытия (двойное ионно-лучевое распыление) [486] небалансное магнетронное распыление [487], формирование покрытий ионно-лучевым распылением в режиме ионно-пучкового фокуса [488].

Применение первых двух методов формирования (термоионное испарение и осаждение из плазмы разряда) нецелесообразно, так как они обладают большими скоростями нанесения, низким уровнем управляемости процесса нанесения, а также сложностью получения пара тугоплавких металлов и соединений.

Метод ионного покрытия позволяет наносить пленки со скоростями в широком диапазоне, точно контролировать энергию и дозу ионного облучения, наносить покрытия из любых тугоплавких материалов. Это же относится и к нанесению пленок небалансным магнетронным распылением. Получение многослойных покрытий ионно-лучевым распылением в режиме ионно-пучкового фокуса обеспечивает, в отличие от предыдущих, изменение энергии конденсирующихся частиц от 20 до 100 эВ, что способствует увеличению адгезии и формированию пленок с плотной микроструктурой [488,489].

Таким образом, для получения адгезионных слоев лучше всего подходят методы ионного покрытия, небалансного магнетронного распыления и ионно-лучевого распыления в условиях ионно-пучкового фокуса. В качестве ионного источника использовался двухлучевой плазменный ускоритель с анодным слоем. Он позволял формировать два независимых пучка ионов: из верхней ступени в виде полого цилиндра и конусообразный из нижней ступени. Первый пучок предназначался для ионной очистки и бомбардировки, второй – для распыления мишени. Ионный источник был смонтирован в подколпачном объеме вакуумной установки Z-400 (рис.15.1). Вакуумный объем откачивался турбомолекулярным насосом, что

обеспечило получение безмасляного остаточного вакуума порядка 10^{-5} мм рт. ст. Для формирования адгезионного и проводящего слоёв использовались соответственно мишени из титана, никеля и немагнитного сплава Ni-18%Cu, что позволило распылять последний с использованием магнетрона.

Нанесение покрытий методом небалансного магнетронного распыления также осуществлялось в вакуумной установке Z-400. Основной магнетронный распылитель имел магнитную систему на основе постоянных самарий–кобальтовых магнитов, диаметр мишени из титана составлял 95 мм. Вокруг основного магнетрона был установлен соленоид диаметром 140 мм. Для питания соленоида использовался блок ВС-24м, рабочий ток составлял 1–2 А, что обеспечивало функционирование основного магнетрона в небалансном режиме и удовлетворительную температуру катушки соленоида.



Рис. 15.1. Внешний вид подколпачного объема вакуумной установки Z-400

На первом этапе исследовалось влияние параметров процесса напыления на удельное объемное сопротивление покрытий ρ_v . Характер зависимости ρ_v от скорости нанесения (V_n) (рис. 15.2 и 15.3) можно объяснить следующим образом. При небольших скоростях нанесения повышенное значение ρ_v обуславливается большей степенью окисления растущей плёнки. С ростом V_n действие этого эффекта убывает и ρ_v снижается. Увеличение ρ_v при больших скоростях нанесения объясняется, по-видимому, уменьшением плотности плёнок.

Температура подложки в процессе нанесения плёнок также оказывает некоторое влияние на удельное объемное сопротивление плёнок, их структуру и адгезию (рис. 15.4). Плёнки Ni, Ni-18%Cu, Ti наносились на подложки из окисленного кремния. Температура подложки варьировалась от 100 до 300 °С.

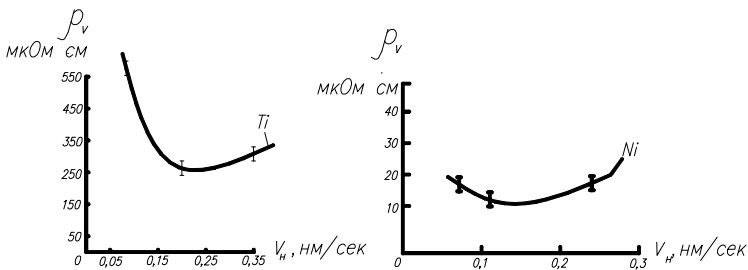


Рис.15.2. Зависимости удельного объемного сопротивления покрытий от скорости нанесения при ионно-лучевом распылении

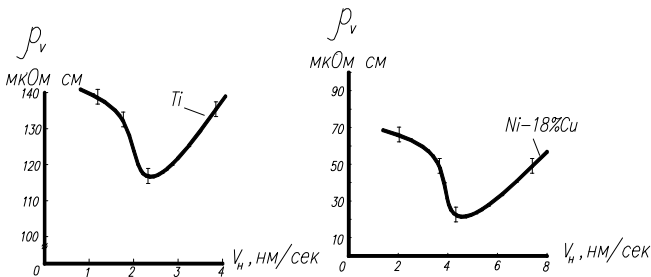


Рис. 15.3. Зависимости удельного объемного сопротивления покрытий от скорости нанесения при магнетронном распылении

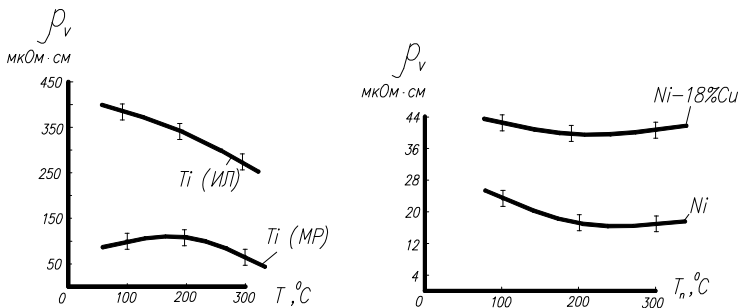


Рис. 15.5. Зависимости удельного объемного сопротивления пленки от температуры подложки при ионно-лучевом и магнетронном распылении

Исходя из полученных зависимостей, можно судить о том, что ρ_v плёнок из никеля и сплава Ni-18%Cu незначительно зависит от

температуры подложки, т.е. структура и состав этих плёнок практически не изменяется. Что касается пленок из титана, то и здесь имеют место монотонные зависимости, что свидетельствует также об отсутствии резких (качественных) изменений в их структуре и составе.

15.2. Формирование покрытий на поверхностях с алмазоподобной структурой ионным методом

Исследование влияния ионной бомбардировки растущей металлической пленки проводили в модернизированной вакуумной установке УРМЗ.279.017. Остаточный вакуум в процессе нанесения был не хуже $2 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. Покрытия из титана и никеля толщиной около 0,05 мкм наносили на подложки из стекла и кремния с алмазоподобным покрытием. В эксперименте использовался двухлучевой ионный источник на основе ускорителя с анодным слоем. Один ионный луч распылял мишень из титана, второй – осуществлял бомбардировку растущей пленки. Т.к. второй луч имел форму полого цилиндра, то формирование покрытия осуществлялось в режиме сканирования. Температура подложки не превышала 30 °С.

В качестве рабочего газа использовался аргон. Исследовалось влияние энергии и тока бомбардирующего пучка ионов на адгезию и микроструктуру покрытий. Ускоряющее напряжение составляло 1; 1,5 и 2 кВ, а ток – 5, 10 и 15 мА. Адгезия оценивалась качественно (отрыв липкой ленты) и количественно (метод нормального отрыва). Было установлено, что ускоряющее напряжение (энергия ионов) не оказывает существенного влияния на величину адгезии. В то же время увеличение тока ионного пучка приводило к значительному повышению адгезии. Так при токе 5 мА она составила 4,2 МПа, а при 15 мА – 6,8 МПа. Следует отметить, что все образцы успешно прошли тест на отрыв липкой ленты. Результаты исследований приведены в табл. 15.2.

Таблица 15.2.

Влияние тока пучка ионов на адгезию покрытий из титана

Ускоряющее напряжение, кВ	Ток ионной бомбардировки, мА	Величина адгезии, МПа
1,0	10	4,8
1,5	10	4,9
2,0	10	5,0
2,0	5	4,2
2,0	15	6,8

Таким образом, введение дополнительной энергии в зону конденсации за счет ионной бомбардировки способствует значительному увеличению адгезии. Это можно объяснить повышением интенсивности десорбции и распыления инородных включений и загрязнений, активацией поверхности алмазоподобной пленки, радиационно-стимулированным внедрением атомов титана в подложку, повышением химической активности атомов металла, локальным разогревом поверхности подложки. Как следствие, результатом вышеперечисленных процессов будет являться формирование переходного слоя из карбида титана, что также способствует усилению адгезионных связей [490].

Исследование микроструктуры покрытий из титана осуществляли с использованием атомно-силового микроскопа NT-206. На рис. 6.24 приведена микроструктура пленки титана на стеклянной подложке при нанесении в условиях облучения растущей пленки ионами аргона при ускоряющем напряжении 2 кВ и токе пучка 15 мА. Анализ изображения показывает, что ионная бомбардировка способствует формирования плотной столбчатой структуры конденсата.

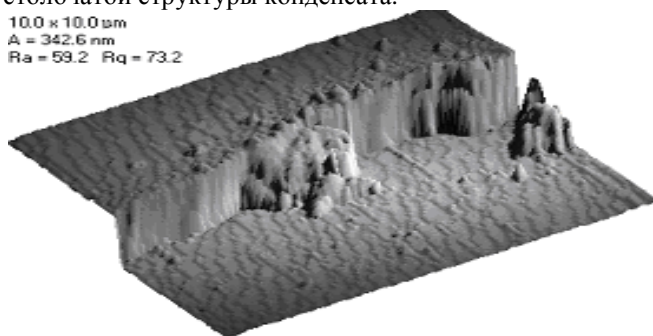


Рис.15.6. Микроструктура пленки титана на стеклянной подложке

Исследовалось влияние энергии и тока бомбардирующего пучка ионов на покрытие. Ускоряющее напряжение составляло 1 и 2 кВ, а ток – 5, 10, 15 и 20 мА. Скорость нанесения без влияния ионной бомбардировки была около 0,2 нм/с.

Результаты исследований приведены на рис.15.7. Наличие ионной бомбардировки приводит к уменьшению ρ_v с 250 до 165 мкОм·см при $U_0=2$ кВ и токе ионов 10–15 мА, что можно объяснить формированием более плотной структуры покрытия. Это также подтверждается и уменьшением уровня ρ_v при увеличении напряжения при ионной

бомбардировке, т.е. повышении энергии ионов. При токе свыше 15 мА наблюдается некоторое увеличение сопротивления, что связано, по-видимому, с большей степенью аморфизации структуры титана.

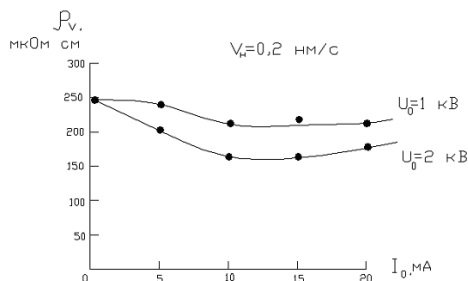


Рис. 15.7. Влияние напряжения и тока при ионной бомбардировке растущей пленки титана на удельное объемное сопротивление

Зависимости температурного коэффициента сопротивления от режимов ионной бомбардировки приведена на рис.15.8. Наблюдается небольшое увеличение ТКС при токе 10 мА, затем происходит снижение до $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$ при 20 мА. Это можно объяснить десорбцией активных газов в процессе роста зерен пленки и, как следствие, уменьшением процессов окисления и нитридации границ зерен.

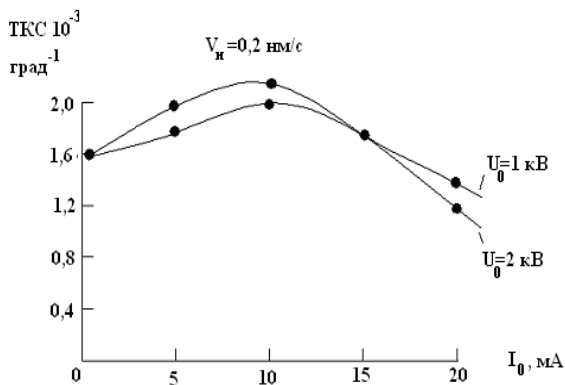


Рис. 15.8. Зависимости ТКС покрытий из титана от напряжения и тока при ионной бомбардировке растущей пленки

На удельное объемное сопротивление оказывает влияние также и величина тока бомбардировки (I_6) растущей пленки при ионно-лучевом распылении (рис.15.9 и 15.10). Исследования проводились при следующих условиях нанесения: остаточное давление в вакуумной камере– $1,8 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.; режим ионной очистки подложки– $U_0=1,8$ кВ, $I_0=10$ мА, $t_0=4$ мин; напряжение разряда при нанесении–4 кВ; ускоряющее напряжение при ионной бомбардировке – 1,0 кВ.

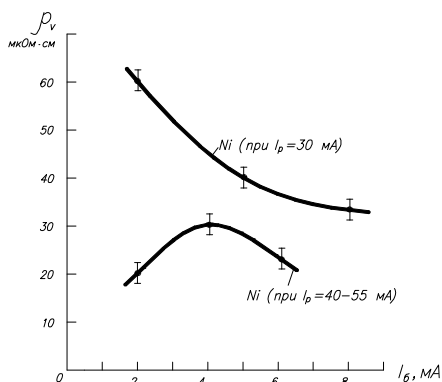


Рис. 15.9. Зависимость удельного объемного сопротивления пленки никеля от тока бомбардировки (I_6) при различных токах разряда (I_p)

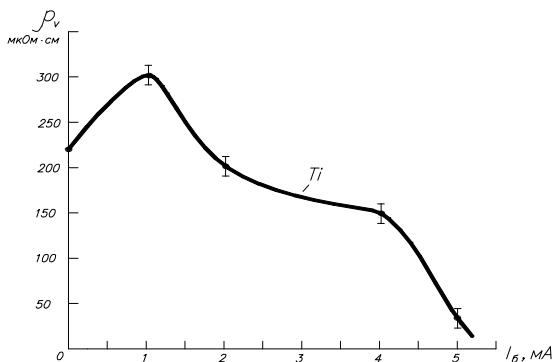


Рис. 15.10. Зависимость удельного объемного сопротивления пленки титана от тока бомбардировки (I_6)

Результаты исследования зависимости ТКС от тока бомбардировки (I_6) растущей пленки представлены на рис. 15.11 и 15.12.

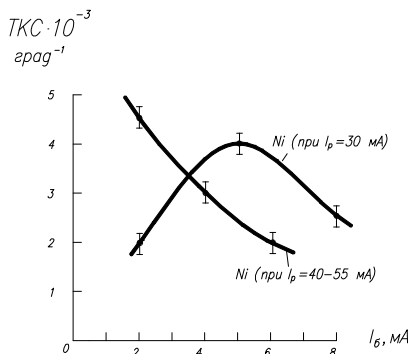


Рис. 15.11. Зависимость ТКС пленки никеля от тока бомбардировки (I_6) при различных токах разряда (I_p) при ионно-лучевом распылении

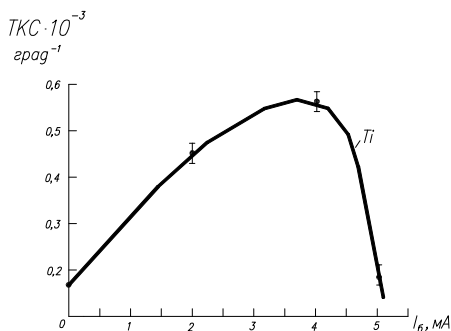


Рис. 15.12. Зависимость ТКС пленки титана от тока бомбардировки (I_6) при ионно-лучевом распылении

Увеличение I_6 , как правило, приводит к снижению удельного объемного сопротивления пленок никеля, но при более высоких скоростях нанесения ($I_p = 40-55 \text{ mA}$) происходит сначала некоторое увеличение ρ_v при $I_6 = 2-4 \text{ mA}$, а затем снижение при $I_6 > 4 \text{ mA}$. То же самое наблюдается и при формировании покрытий из титана (рис.15.10). Похожие закономерности наблюдаются и в зависимости ТКС пленок никеля и титана от тока ионной бомбардировки. Снижение температурного коэффициента сопротивления при повышенных токах

бомбардировки можно связать с преобладанием токопереноса за счет туннелирования между зёрнами.

15.3. Свойств тонкопленочных покрытий и параметров границ раздела при небалансном магнетронном распылении

Нанесение покрытий методом небалансного магнетронного распыления осуществлялось в вакуумной установке Z-400. Остаточный вакуум в процессе нанесения был не хуже $2 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. Покрытия из титана толщиной около 0,15 мкм наносили на подложки из кремния, покрытые пленкой алмазоподобного углерода. Температура подложки не превышала 50°C. Адгезию покрытий определяли как качественно (отрыв липкой ленты) так и количественно с использованием метода нормального отрыва приклеенного стального цилиндра. Покрытия из титана наносились при различных токах разряда (0,5 А; 1,0 А; 1,5 А) и при варьировании положительного потенциала на подложке в пределах 25–150 В. Для сравнения были сформированы покрытия в обычном (балансном) магнетронном режиме (табл. 15.3).

Таблица 15.3.

Адгезия покрытий, сформированных в балансном и небалансном магнетронном режимах

$U_p, В$	$I_p, А$	$U_n, В$	Режим работы	Адгезия, МПа
380	0,5	-	небалансный	4,5
400	1,0	-	небалансный	4,2
420	1,5	-	небалансный	3,9
400	1,0	50	небалансный	4,7
400	1,0	100	небалансный	5,3
400	1,0	150	небалансный	6,7
400	1,0	-	балансный	2,8

Все образцы успешно прошли испытания на адгезию с использованием отрыва липкой ленты. Количественные измерения адгезии свидетельствуют об усилении адгезионных связей при увеличении положительного потенциала на подложке, а также при уменьшении тока разряда, т.е. снижения скорости нанесения покрытий.

Исследование микроструктуры покрытий осуществляли с использованием атомно-силового микроскопа NT-206. На рис.15.13 приведена микроструктура пленки титана на ситалловой подложке при нанесении в небалансном режиме и потенциале на подложке – 75 В. Анализ фотографии показывает, что покрытие обладает выраженной

столбчатой структурой, что характерно для конденсатов, получаемых в условиях бомбардировки растущей пленки ионами.

Для исследования электрофизических параметров пленка титана наносилась на подложки из окисленного кремния. Установлено, что ρ_v уменьшалось с 80 до 68 мкОм·см при изменении потенциала на подложке от 0 до 125 В. Это свидетельствует об увеличении плотности покрытия. Температурный коэффициент сопротивления при этом уменьшился с $1,6 \cdot 10^{-3}$ до $0,2 \cdot 10^{-3}$ град $^{-1}$. Результаты исследования зависимости ρ_v покрытий из титана и сплава никель-медь от тока дополнительного соленоида (I_c) представлены на рис. 15.14 и 15.15.

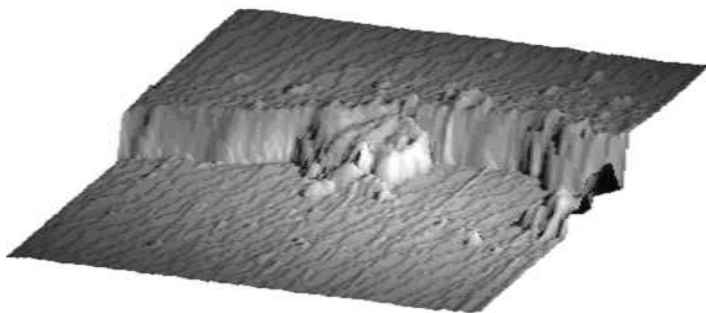


Рис.15.13. Микроструктура пленки титана, полученной небалансным магнетронным распылением

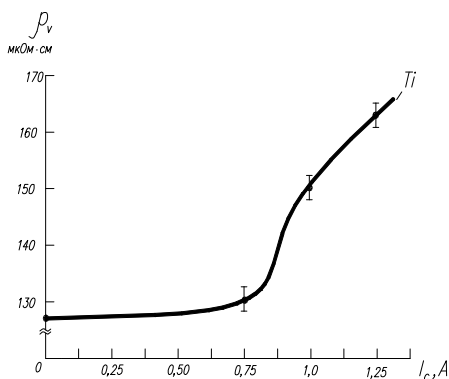


Рис. 15.14. Зависимость ρ_v пленки титана от тока дополнительного соленоида (I_c) при небалансном магнетронном распылении

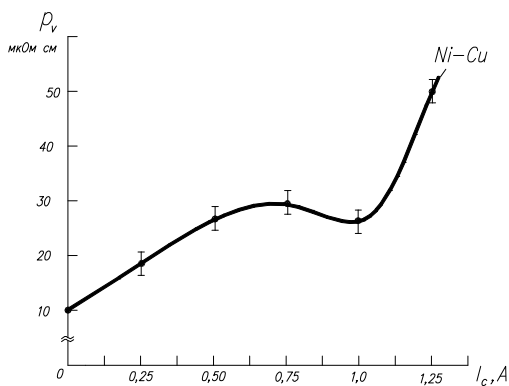


Рис.15.15. Зависимость ρ_v пленки сплава Ni-Cu от тока дополнительного соленоида (I_c) при небалансном магнетронном распылении

Результаты исследования зависимости ТКС от тока дополнительного соленоида (I_c) представлены на рис. 15.16 и 15.17.

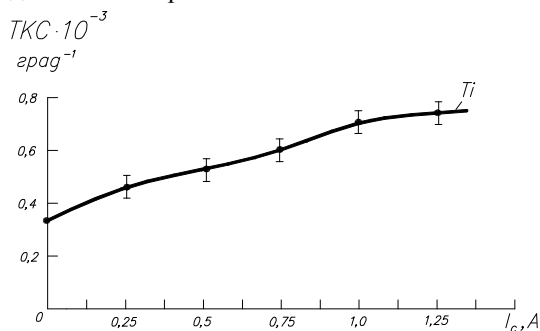


Рис. 15.16. Зависимость ТКС пленки титана от тока дополнительного соленоида (I_c) при небалансном магнетронном распылении

Результаты исследования зависимости ρ_v и ТКС от напряжения на подложке (U_n) представлены на рис. 15.18 и 15.19.

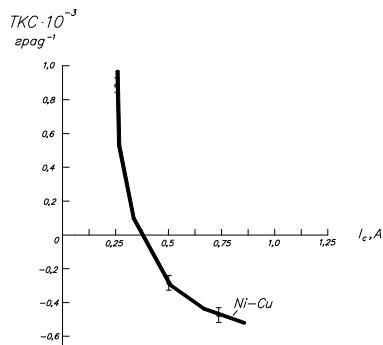


Рис. 15.17. Зависимость ТКС пленки сплава Ni-Cu от тока дополнительного соленоида (I_c) при небалансном магнетронном распылении

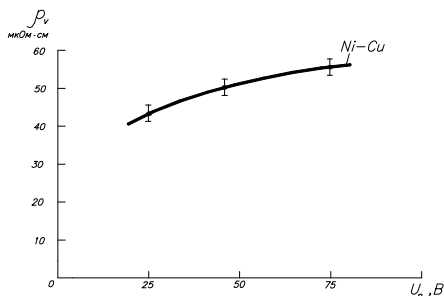


Рис. 15.18. Зависимость ρ_v пленки сплава Ni-Cu от напряжения на подложке (U_n) при небалансном магнетронном распылении

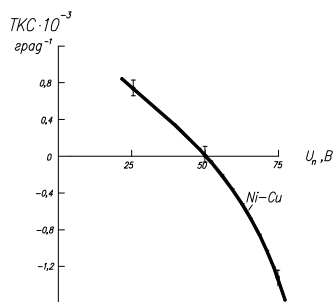


Рис. 15.19. Зависимость ТКС пленки сплава Ni-Cu от напряжения на подложке (U_n) при небалансном магнетронном распылении

В отличие от ионной бомбардировки растущей пленки при ионно-лучевом распылении, небалансное магнетронное распыление приводит к увеличению ρ_v почти в два раза при изменении тока соленоида от 0 до 1,25 А. Это можно объяснить более высокой плотностью ионов аргона в области подложки, что может привести к возникновению большей концентрации дефектов в структуре покрытия. Это является и причиной увеличения ТКС у пленок титана. В тоже время увеличение тока соленоида приводит к снижению ТКС и его переход в область отрицательных значений для пленок Ni-Cu, что можно связать с упорядочиванием структуры сплава при нагреве.

Наличие потенциала на подложке способствует снижению ρ_v у пленок сплава Ni-Cu и дальнейшему уменьшению ТКС.

15.4. Формирование покрытий ионно-лучевым распылением в режиме ионно-пучкового фокуса

Исследование характеристик ионных пучков в области конденсации на подложке имеет большое значение для определения оптимальных режимов нанесения покрытий. В частности, параметры покрытий зависят от энергии и плотности потока частиц, попадающих на подложку. Эксперименты проводились с помощью модернизированного ионного источника на базе ускорителя с анодным слоем и коническим ионным пучком, отличающегося от обычного источника наличием дополнительной магнитной системы на основе самарий-кобальтовых постоянных магнитов, что позволило создать в области пересечения ионных лучей напряженность магнитного поля 150–200 Э, а также использованием мишени-диафрагмы с центральным отверстием диаметром около 10 мм.

Ионный источник размещался в вакуумном объеме установки вакуумного напыления ВУ-1А. Остаточный вакуум не превышал значения $2 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст., мишень-диафрагма изготавливалась из медной пластины, рабочим газом служил аргон. На первом этапе было проведено исследование влияния давления аргона и ускоряющего напряжения на аноде на величину ионного тока подложки-коллектора (рис.15.20).

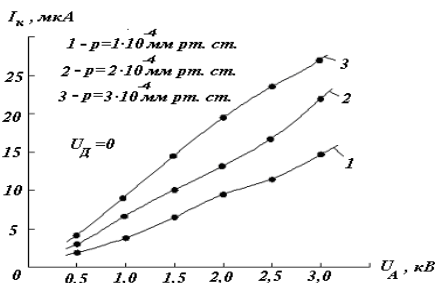


Рис.15.20. Влияние давления аргона и ускоряющего напряжения на аноде на величину ионного тока подложки-коллектора

Анализ зависимостей показывает, что с ростом давления газа и ускоряющего напряжения ток ионов также монотонно возрастает. Было также установлено, что напряжение на диафрагме неоднозначно влияет на величину тока.

Измерение энергии ионов проводили с применением многосеточного зонда, путем снятия тормозных характеристик. На рис.15.21 представлены результаты исследований.

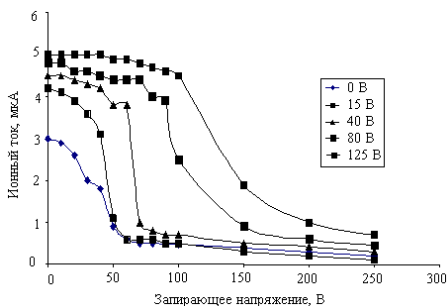


Рис. 15.21. Тормозные характеристики частиц в области подложки при разных потенциалах диафрагмы

Установлено, что энергия ионов аргона и меди находилась в пределах 40–150 эВ, и увеличивалась с ростом напряжения на диафрагме.

Проведено исследование влияния рабочего давления аргона, ускоряющего напряжения на аноде и напряжения на диафрагме на скорость нанесения пленок металлов при работе ионного источника в

условиях ионно-пучкового фокуса. Покрyтия наносились на подложки из кремния. Толщина пленок измерялась с помощью профилометра-296. В качестве мишени-диафрагмы использовался титан. Подложка располагалась на расстоянии 15 мм от диафрагмы.

Установлено, что скорость нанесения возрастает с увеличением рабочего давления аргона, ускоряющего напряжения и тока разряда. В тоже время зависимость скорости нанесения от напряжения на диафрагме имеет немонотонный характер. Для мишени из титана она находилась в пределах 0,007–0,042 нм/с.

Исследовано влияние ускоряющего напряжения на аноде, температуры подложки и напряжения на диафрагме на адгезию пленок титана к поверхностям с алмазоподобной структурой. Покрyтия наносились на подложки из кремния, покрытые пленкой алмазоподобного углерода толщиной 500 нм. Адгезия оценивалась качественно и количественно. В первом случае использовался скотч, который прикреплялся к пленке, а затем резко отрывался. Все свеженапыленные образцы прошли такой тест на адгезию. Однако покрyтия, которые наносились при температуре подложки менее 100⁰С, через 2–3 часа начинали отслаиваться и шелушиться, что связано, по-видимому, с высоким уровнем внутренних механических напряжений. Количественно адгезия оценивалась методом нормального отрыва. Результаты измерений приведены в табл. 15.4.

Таблица 15.4.

Результаты измерений адгезии методом нормального отрыва

U _A , кВ	U _д , В	T _п , °С	P, МПа
3,0	0	200	3,1
3,0	125	200	4,9
2,0	80	200	3,2
4,0	80	200	3,5
3,0	80	100	3,3
3,0	80	300	5,4

Из результатов, приведенных в табл.15.4, видно, что адгезионная связь между титаном и алмазоподобной пленкой практически не зависит от энергии первичного ионного пучка, т. е. ускоряющего

напряжения U_d . Наблюдается значительное увеличение адгезии при росте напряжения на диафрагме-мишени (повышение энергии конденсирующихся атомов) и при повышении температуры подложки.

Микроструктуру покрытий исследовали с применением атомно-силовой микроскопии и с использованием микроскопа NT-206. Исследуемые покрытия из титана, полученные в условиях ионно-пучкового фокуса, наносились на подложки из кремния. Температура подложки составляла 300°C . Было проведено исследование влияния потенциала мишени-диафрагмы на микроструктуру покрытий. На рис.15.22 приведена микроструктура титановой пленки, полученной при $U_d=30\text{ В}$, а на рис.15.23 – морфология поверхности покрытия при $U_d=150\text{ В}$. Полученные данные свидетельствуют о плотной мелкозернистой структуре покрытий. Увеличение энергии конденсирующихся частиц, что происходит при повышении напряжения на диафрагме-мишени, приводит к локальному появлению острых образований, а также к уменьшению величины зерна.

Исследовано влияния напряжения на диафрагме и температуры подложки на электрофизические параметры пленок титана при работе ионного источника в условиях ионно-пучкового фокуса.

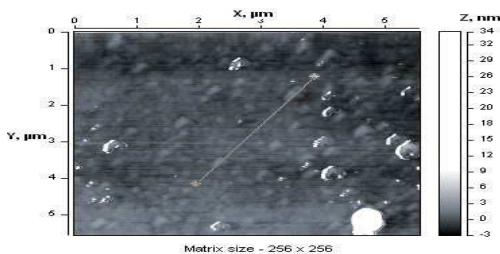


Рис. 15.22. Микроструктура покрытия при $U_d = 30\text{ В}$

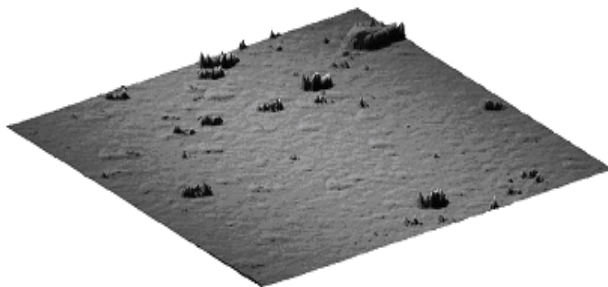


Рис. 15.23. Морфология покрытия титана

Покрyтия наносились на подложки из стекла. Температурный коэффициент сопротивления измерялся в диапазоне 20-100 °С. Установлено, что наименьшее удельное объемное сопротивление ($31 \cdot 10^{-6}$ Ом·м) имели пленки, полученные при температуре подложки 50 °С. При увеличении температуры подложки до 300 °С сопротивление увеличилось до $35 \cdot 10^{-5}$ Ом·м. Повышение температуры конденсации приводит к снижению удельного сопротивления, однако в данном случае, по-видимому, происходит более эффективное химическое взаимодействие титана с остаточными газами из-за повышенной энергии атомов и ионов в области вторичного разряда, что вызывает окисление и нитридизацию металла. Увеличение напряжения на диафрагме до 50 В приводило к росту удельного сопротивления пленки почти в три раза.

Температурный коэффициент сопротивления был отрицателен и изменялся в пределах $1,74 \cdot 10^{-3}$ до $5,1 \cdot 10^{-3}$ град⁻¹, что связано с малой толщиной нанесенных пленок. Повышение температуры подложки и напряжения на диафрагме приводило к росту ТКС, что можно объяснить большей степенью окисления металла и, соответственно, усилением механизма туннелирования электронов через тонкую диэлектрическую пленку окислов титана

15.5. Исследование параметров алмазных теплопроводов, металлизированных с применением разработанной технологии

Теплопроводность металлизированных АТО оценивалась путем исследования теплопереноса через образец на установке типа УКТ-3. Исследуемый образец помещался между алмазной пластиной прибора, которая разогревается мощным транзистором, и алмазной иглой, охлаждаемой с помощью микрохолодильника Пельтье. Пластина и игла изготавливались из безазотного алмаза с теплопроводностью не ниже 2000 Вт/м·К. При установке иглы на исследуемый образец разность температур между алмазной пластиной прибора и иглой путем обратной связи автоматически поддерживалась постоянной. Точность измерения теплопроводности составляла ~20 %.

Измеренные значения теплопроводности неметаллизированных АТО, используемых в экспериментах, находились в диапазоне 600-1400 Вт/м·К. Экспериментальные данные по теплопроводности АТО до и после металлизации приведены в табл. 15.5. Результаты показывают, что нанесение металлических покрытий на АТО ведет к снижению его теплопроводности. Однако теплоотводящее основание на основе

синтетического алмаза, металлизированные методом ионно-лучевого напыления, всё же превосходят по своим тепловым параметрам медные теплоотводы [491].

Таблица 15.5.

Результаты исследований теплопроводности

Ионно-лучевое распыление			Химическое осаждение		
№ образца	$H_{исх}$, Вт/м·К	$H_{мет}$, Вт/м·К	№ образца	$H_{исх}$, Вт/м·К	$H_{мет}$, Вт/м·К
1	949	657	2	600	109
3	1228	657	4	1078	154
5	903	533	Вакуумно-плазменное распыление		
6	900	894	7	1012	610

$H_{исх}$ – исходное значение теплопроводности неметаллизированного АТО, $H_{мет}$ – значение теплопроводности металлизированных АТО.

Исследована паяемость АТО с никелевым покрытием. Коэффициент растекания припоя ПОС 61 при температуре 200°C определялся как:

$$K_p = [(H_0 - H_p) / H_0] \cdot 100\%, \quad (15.1)$$

где H_p – высота припоя после растекания, мкм, H_0 – высота припоя до растекания:

$$H_0 = ([2\sigma_{1,2}(1 - \cos \Theta)] / \rho g)^{1/2}, \quad (15.2)$$

где $\sigma_{1,2}$ – напряжение на границе твердой и жидкой фазы (0,5 Н/м²), Θ – угол несмачивания (180°), ρ – плотность припоя ПОС 61 (8500 кг/м³), g – ускорение свободного падения.

Подставляя известные данные в формулу (15.2), получаем $H=4898,8$ мкм. Формула (15.1) преобразуется к виду:

$$K_p = ([4900(\text{мкм}) - H_p] / 4900(\text{мкм})) \cdot 100\%.$$

Высота капли припоя на подложке после растекания (H_p) определяется путем косвенных измерений. Посредством микрометра измеряется толщина подложки с каплей припоя на ней h_k , далее измеряется собственно толщина подложки b_n , а высота капли припоя на подложке определяется как $H_p = h_k - b_n$. Результаты измерений коэффициента растекания приведены на рис.15.24.

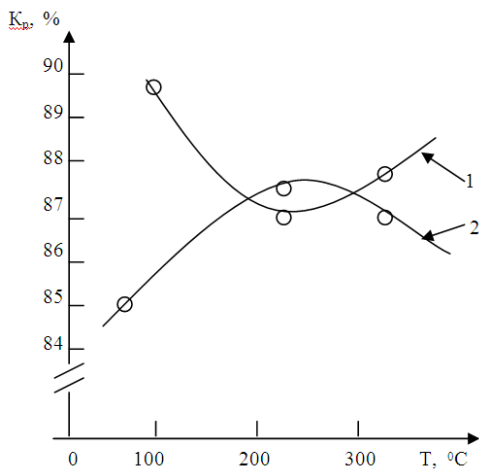


Рис.15.24. Зависимость коэффициента растекания от температуры: 1 – ионно-лучевое распыление, 2 – магнетронное распыление

Установлено, что растекание составляло 86–90% и зависело от температуры подложки при нанесении покрытия[492].

Глава 16. МЕТАЛИЗАЦИИ ПОЛИМЕРОВ ИОННО-ЛУЧЕВЫМ И МАГНЕТРОННЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ

16.1. Особенности металлизации полимеров

В настоящее время в промышленности широко используются металлизированные пластмассы. Они сочетают низкую плотность и простоту переработки, присущие полимерам, с такими преимуществами металлов, как электропроводность и высокая поверхностная твердость. Металлизированные полимеры находят применение в машиностроении, радиотехнической и электронной отраслях промышленности и т.д. В процессе нанесения металлических пленок на полимеры существует ряд сложностей, которые необходимо преодолевать. Как правило, полимерные материалы характеризуются низкими значениями поверхностной энергии, плохо смачиваются растворителями, плохо склеиваются, имеют низкую адгезию к напыленным слоям металлов. Металлические пленки так же могут иметь ряд недостатков, таких как неоднородность пленки, плохая структура поверхности (морфология), разрушение пленки через небольшой промежуток времени и т.д. Вследствие этого приходится искать методы нанесения пленок с лучшей адгезией, и более качественные по структуре поверхности.

Целью металлизации полимеров является придание новых свойств изделиям – функциональных (электро- и теплопроводность, поглощение или отражение света или радиоволн, твердость и износостойкость) или декоративных. С другой стороны, технологические потребности рынка повышают актуальность получения высококачественных тонкопленочных слоев металлов, сплавов, диэлектриков и полупроводников. В настоящее время трудно найти область техники, где бы пленочные покрытия или изделия на их основе не выполняли определенной функциональной роли. В связи с развитием отраслей электронного и оптического приборостроения, машиностроения и металлообработки, средств коммуникации и авиастроения возрастает интерес к получению покрытий с особенными электрофизическими, оптическими, механическими, жаростойкими и антикоррозионными свойствами на различных органических и неорганических материалах. Особенно актуально использование тонких пленок на поверхности полимеров при разработке новых ЖКИ, гибких дисплеев и электронной бумаги. Такие материалы используются при производстве барьерных слоев в упаковочной пленке, в электронной продукции, при изготовлении клавиатур, печатных плат, изделий для энергохозяйства и др.

Расширение диапазона решаемых задач и стремление перейти к непрерывным технологическим процессам существенно повысили интерес к получению тонкопленочных покрытий ионно-плазменными методами [493-497]. Ионно-плазменные методы формирования тонкопленочных покрытий позволяют получать тонкопленочные соединения с контролируемым стехиометрическим составом, управлять в широком диапазоне структурно-фазовыми свойствами слоев, а также границей раздела пленка-подложка, обеспечивают однородность покрытий на подложках больших размеров и возможность создания установок непрерывного действия.

Одним из наиболее перспективных и современных методов модификации поверхности полимеров является воздействие низкотемпературной плазмы [498], которое позволяет изменить свойства поверхностей этих материалов в широких пределах и значительно расширить области их использования. Экологически чистые современные плазмохимические методы значительно выигрывают по сравнению с химической модификацией [499], при которой используются такие агрессивные реагенты, как кислоты, гидроксилы, щелочноземельные металлы и их соединения и т. п. С середины 80-х годов во многих промышленно развитых странах широко производится необходимое вакуумное оборудование, созданное специально для реализации плазмохимических процессов.

Наиболее важной особенностью процесса плазмохимической модификации полимерных материалов, определяющей особый интерес к этому методу, является то, что изменениям подвергается только обрабатываемая поверхность материала и очень тонкий приповерхностный слой, толщина которого, по разным оценкам, составляет от 100Å до нескольких микрон. Основная же масса полимера не изменяется, сохраняя механические, физико-химические и электрофизические свойства модифицируемого материала.

Воздействие плазмы на поверхность полимера позволяет изменять, в основном, его контактные свойства (смачивание, адгезию к тонким слоям металла, наносимого как с помощью нанесения в вакууме, так и другими методами, способность к склеиванию, адгезию используемых при печати красителей и т.п.). Как правило, улучшение адгезионных свойств полимеров под воздействием плазмы связано не только с очисткой поверхности от различного рода загрязнений, но и с образованием гидрофильных групп различной химической природы, обеспечивающих высокие адгезионные свойства модифицированных поверхностей. Состав, структура и свойства таких полярных групп

зависят как от природы полимера, так и от свойств плазмы и природы плазмообразующего газа. Если в качестве рабочего газа плазмы используется кислород или воздух, то на поверхности полимера образуются кислородсодержащие полярные группы (карбонильные, спиртовые, перекисные, простые и сложные эфирные, лактонные и т.п.). В случае применения аммиака или его смесей с водородом на поверхности возникают азотсодержащие группы. Воздействие разряда в атмосфере инертных газов приводит к образованию активных свободных радикалов, которые на воздухе превращаются в гидроперекисные и перекисные, а затем – в стабильные кислородсодержащие полярные группы.

Осаждение тонких пленок на полиметилметакрилат (ПММА) или органическое стекло обусловлено некоторыми трудностями [500]. Во-первых, ПММА имеет пористую структуру, которая поглощает газы и влагу из воздуха, а затем выделяет их в вакуум при осаждении пленок. Во-вторых, термическое расширение ПММА гораздо больше, чем таковое у напыляемых пленок, которые, как правило, являются не органическими материалами. В-третьих, на подложку из ПММА, для получения твердых покрытий, нельзя напылять материалы при повышенных температурах. Таким образом, осаждая покрытие на чистую поверхность ПММА, можем столкнуться с плохой адгезией или мягкой поверхностью, которая легко царапается.

Существует ряд методов металлизации полимеров:

- нанесение SiO_2 плазмохимическим осаждением,
- нанесение полимерного слоя плазменной полимеризацией,
- нанесение металлического покрытия (Cr, Ni-C),
- предварительная плазменная обработка,
- передача атомам дополнительной энергии в процессе роста пленок.

Данные методы довольно сложны. Существует способ решения задачи, суть которого состоит в удалении адсорбированной воды и газов, и нанесение кислородо-обедненных оксидов до осаждения пленки. Из исследований, проведенных в [500] установлено, что все покрытия на ПММА без защитного слоя не прошли тест на адгезию. Обнаружено, что предварительное нанесение кислородо-обедненных оксидов SiO_x и TiO_x ($x < 2$) улучшило адгезионные показатели. В тестах на твердость пленки из SiO_2 ведут себя лучше чем из TiO_2 .

Для металлизации полимеров применяют различные способы:

– механические – покрытие формируют заранее в виде фольги или слоя требуемой конфигурации и затем крепят его к поверхности полимера.

– физические – атомы металлов различными способами осаждаются на подложку.

– химические – металл образуется в ходе химической реакции, протекающей на покрываемой поверхности.

Химические способы металлизации [499] подразделяют по виду среды, в которой протекает реакция (газофазная, в растворах, в твердой фазе), или по типу металлогенной реакции: разложение (термолиз, электролиз, фотолиз, радиолит) или восстановление (различают по восстановителю – водород, гипофосфит, борогидрид, формальдегид и т.п.).

При металлизации химическим способом полимеры чаще всего покрывают серебром, медью, никелем, сплавами Ni-Co, золотом, оловом, родием; иногда палладием, платиной, свинцом; реже алюминием, хромом. При химико-гальванической металлизации на электропроводный подслои наносят многослойные покрытия, состоящие из слоев матовой и блестящей меди, никеля, хрома, олова, цинка; иногда золота, серебра или композиционные покрытия. В настоящее время химико-гальваническим способом металлизуют не только АБС-пластики, но и другие пластмассы: полифениленоксид, полипропилен, полисульфон, полиакрилы, капрон, эпоксидные смолы.

К физическим методам относятся: термическое испарение в вакууме, ионное, катодное, магнетронное, распыления и др. Формирование покрытия осуществляется при бомбардировке мишени ионами с последующим осаждением материала мишени на подложку или при испарении материала на подложку. Методы ионно-плазменного нанесения получили широкое развитие как альтернатива способам формирования слоев термическим и электроннолучевым испарением.

В связи с этим представляются перспективными методы формирования пленок, основанные на ионной бомбардировке выращиваемой фазы. Облучение поверхности подложки ионами в процессе выращивания пленок позволяет в широких пределах управлять свойствами наносимых слоев независимой регулировкой потоков на подложку [494]. Величина энергии, приходящейся на один осаждаемый атом, в этом случае может достигать нескольких сотен эВ, что позволяет синтезировать пленки с уникальными свойствами [495]. Использование автономных ионных источников дает возможность реализовывать различные варианты процессов нанесения. При этом возникают вторичные электроны, отраженные и выбитые ионы, которые попадают

на подложки. Преобладающая энергия электронов составляет < 5 эВ, ионов – 25–30 эВ (рис.16.1).

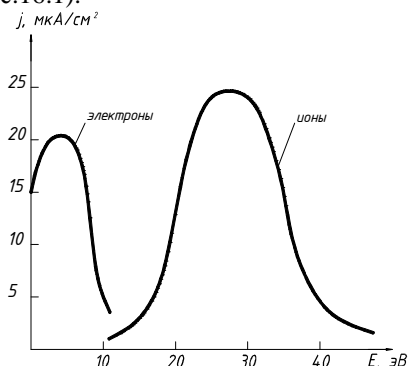


Рис. 16.1. Энергетические спектры частиц при ионно-лучевом распылении

Так как ионизация распыленного материала мишени незначительна, то можно предположить, что ионный поток состоит в основном из ионов рабочего газа (аргона). Причем, по всей вероятности, электроны являются отраженными от поверхности мишени ионами падающего пучка. Электронная составляющая представляет собой вторичные электроны, образующиеся в результате взаимодействия распыляющего иона с поверхностью.

16.2. Металлизация полимеров ионно-лучевым и магнетронным распылением

Формирование покрытий на полимерных подложках осуществляли с применением установок вакуумного напыления УРМ 3.279.017 (ионно-лучевое распыление, ионно-лучевое распыление с ионной бомбардировкой растущей пленки), Z-400 фирмы “Leybold-Heraeus” (магнетронное и небалансное магнетронное распыления), ВУ-1А (ионно-лучевое распыление в режиме ионно-пучкового фокуса). В качестве подложек использовались полиметилметакрилат (ПММА) или органическое стекло и целлюлоза. Для измерения толщины и удельного поверхностного сопротивления использовались подложки из кремния и стекла, соответственно.

В качестве ионного источника использовался двухлучевой плазменный ускоритель с анодным слоем, упрощенная схема которого

показана на рис. 16.2. Он позволяет формировать два независимых пучка ионов: из верхней ступени в виде полого цилиндра и конусообразный из нижней ступени. Первый пучок предназначен для ионных очистки и бомбардировки, второй – для распыления мишени. Для осуществления нагрева подложек в процессе нанесения пленок использовался специальный подложкодержатель, снабженный автономным нагревательным элементом в виде поликоровой пластины с намотанной на нее проволокой из нихрома. Температура подложки контролировалась хромель-копелевой термопарой.

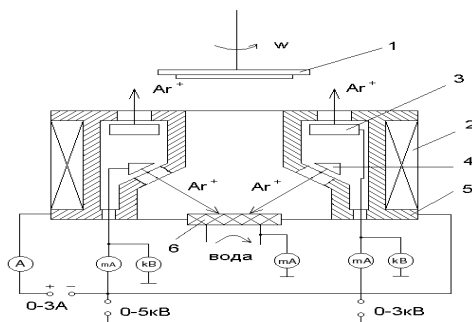


Рис. 16.2. Схема двухлучевого плазменного ускорителя с анодным слоем: 1 – подложкодержатель, 2 – соленоид, 3 – анод верхней ступени, 4 – анод нижней ступени, 5 – магнитопрод, 6 – мишень, охлаждаемая водой

Перед нанесением покрытий подложки из полимеров очищали этиловым спиртом. Адгезия покрытий оценивалась качественно – методом отрыва липкой ленты. Формирование покрытий из титана осуществляли на подложках из ПММА и целлюлозы. Ускоряющее напряжение на аноде составляло 2,5–4,0 кВ, ток мишени – 25–75 мА. Получены пленки титана на ПММА и целлюлозе толщиной 100 нм.

Измерение адгезии покрытий на ПММА к целлюлозе показало, что пленки легко отслаивались. На рис.16.2 приведена морфология поверхности пленок титана на ПММА, полученных при различных режимах работы ионного источника. Увеличение температуры подложек до 100°C также не способствовало улучшению адгезии.

Исследовано влияние предварительной ионной очистки поверхности полимерной подложки на адгезию. Напряжение ионной очистки составило 1,5 кВ, ток – 5 мА, время – 5 мин. Использовались ионы

кислорода и аргона. На рис. 16.4 представлена морфология поверхности покрытий. Адгезия пленок титана к ПММА была неудовлетворительной, а к целлюлозе – относительно неплохой.

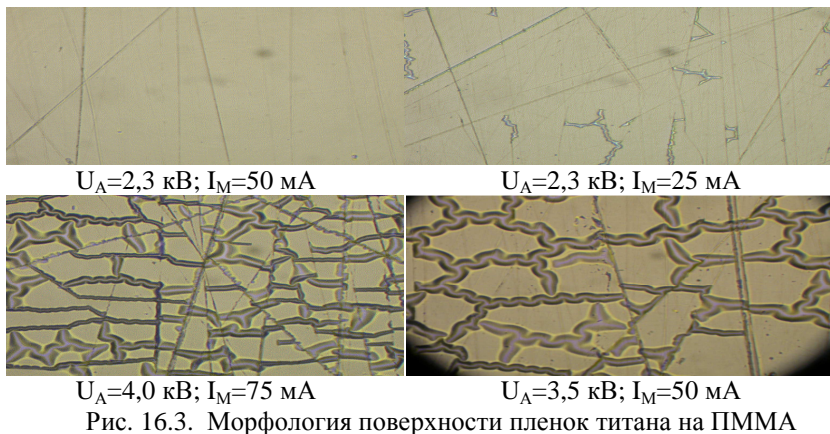


Рис. 16.3. Морфология поверхности пленок титана на ПММА

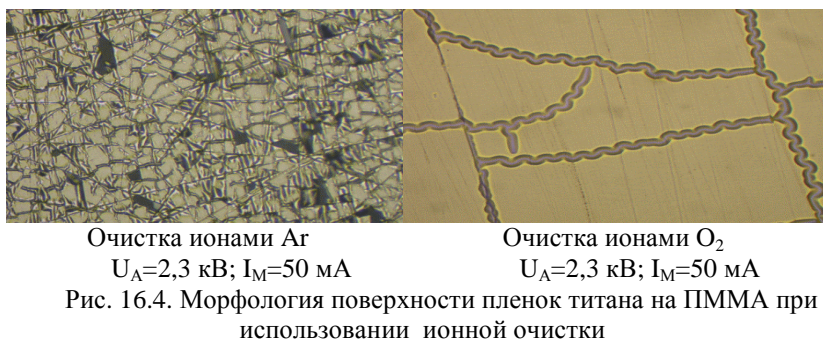


Рис. 16.4. Морфология поверхности пленок титана на ПММА при использовании ионной очистки

Применение магнетронных распылительных устройств для нанесения покрытий представляется весьма привлекательным в виду высоких скоростей нанесения. Характерным для магнетронного распыления является высокий уровень сопутствующего энергетического потока, источником которого является разрядная плазма, которая хотя и локализована в области мишени, но практически не изолирована от подложки. Наличие большого потенциала на мишени создает электрическое поле в зазоре подложка-мишень. Основными составляющими энергетического поля являются электронная и ионная составляющие (рис. 16.5)

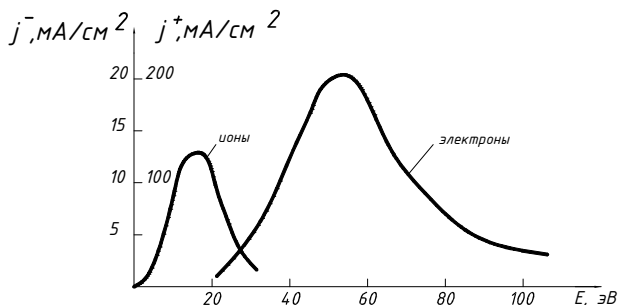


Рис.16.5. Энергетические спектры заряженных частиц, попадающих на подложку при магнетронном методе распыления

Нанесение покрытий из титана на подложки из ПММА осуществляли при различных мощностях разряда от 370 Вт до 900 Вт. При этом скорость нанесения составила 1–4 нм/с, а величина удельного сопротивления – 115–140 мкОм·см. Морфология покрытия, полученного магнетронным распылением при $U_p=390$ В и $I_p=1$ А представлена на рис.16.6. Покрытия тест на адгезию не прошли.

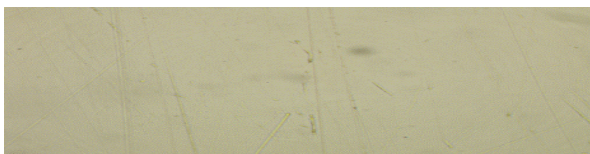


Рис.16.5. Морфология покрытия, полученного магнетронным распылением

16.3. Металлизация полимеров небалансным магнетронным распылением и ионным покрытием

В обычном или сбалансированном магнетроне плазменный разряд ограничивается областью мишени. Для управления свойствами пленок ионной бомбардировкой в этом случае необходимо прикладывать отрицательный потенциал к подложке. Для получения плотных пленок без больших внутренних напряжений предпочтительны ионы низкой энергии (100 эВ) при высокой плотности ионного тока ($> 2 \text{ mA}/\text{cm}^2$).

Необходимые для этого условия реализуются в небалансных магнетронах. В наших экспериментах использовался балансный магнетрон с дополнительным соленоидом (рис.16.6)

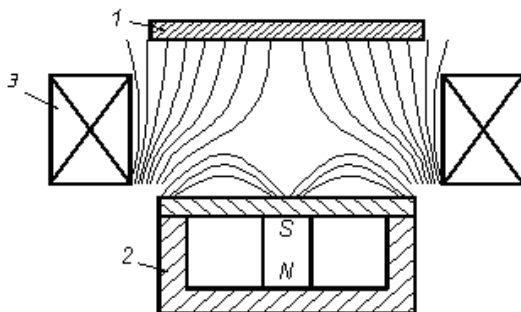


Рис. 16.6. Схема небалансного магнетрона: 1 – подложка, 2 – балансный магнетрон, 3 - соленоид

В результате исследования тока подложки от тока дополнительного соленоида установлено, что ток увеличивается по линейному закону с ростом тока соленоида (рис.16.7).

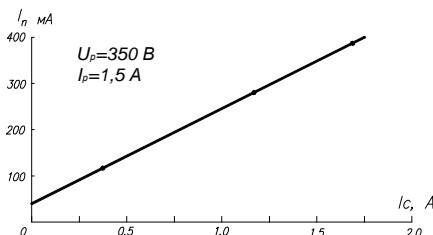


Рис.16.7. Зависимость тока подложки от тока дополнительного соленоида при небалансном магнетронном распылении

Для исследования морфологии поверхности и адгезии были сформированы покрытия при следующих режимах: $U_p=325-350$ В; $I_p=1,5$ А; $I_c=1$ А; $U_{п}=- (0-150)$ В. Толщина покрытий составляла ~ 120 нм. На рис.16.8 приведена морфология покрытий из титана на ПММА. Тесты на адгезию прошли покрытия сформированные при $U_{п} \geq -50$ В.

Формирование покрытий ионно-лучевым распылением с ионной бомбардировкой растущей пленки осуществляли методом чередующего ионного покрытия, т.е. подложка перемещалась последовательно через зону напыления, затем через бомбардирующий пучок.

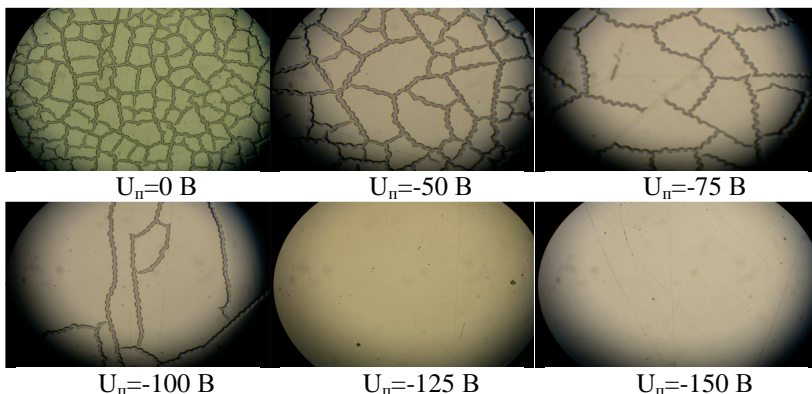


Рис.16.8. Морфология поверхности пленок титана на ПММА, полученных небалансным магнетронным распылением

Исследовалось влияние энергии и тока бомбардирующего пучка ионов на покрытие. Ускоряющее напряжение составляло 1 и 2 кВ, а ток – 5, 10, 15 и 20 мА. Скорость нанесения без влияния ионной бомбардировки была около 0,2 нм/с. На рис.16.9 приведена морфология покрытий полученных ионно-лучевым распылением с ионной бомбардировкой растущей пленки. Поверхность получилась без дефектов и внутренних напряжений, о чем говорит сохранение ее целостности со временем, однако тест на адгезию подложки не прошли.

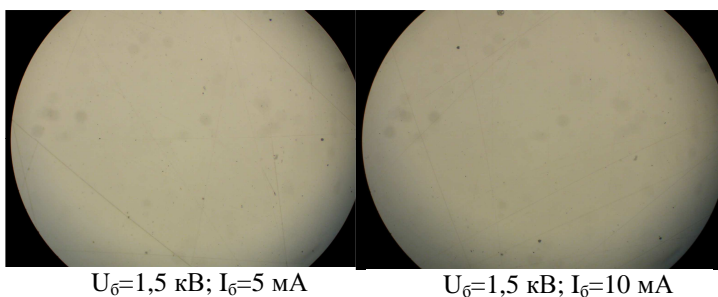


Рис.16.9. Морфология поверхности пленки титана на ПММА, полученной ИЛР с бомбардировкой растущей пленки

16.4. Исследование процессов нанесения покрытий на полимерные подложки ионно-лучевым распылением в режиме ионно-пучкового фокуса

Формирование покрытий ионно-лучевым распылением в режиме ионно-пучкового фокуса проводилось с помощью модернизированного ионного источника на базе ускорителя с анодным слоем и коническим ионным пучком, отличающегося от обычного источника наличием дополнительной магнитной системы на основе самарий–кобальтовых постоянных магнитов, что позволило создать в области пересечения ионных лучей напряженность магнитного поля 150–200 эВ. В эксперименте использовались мишени-диафрагмы из титана с центральным отверстием диаметром около 10 мм.

Прямое осаждение из ионных пучков позволяет легко варьировать и контролировать процесс формирования покрытий. Большая энергия осаждаемых частиц обеспечивает отличную адгезию к подложкам, высокую плотность и, соответственно, отличные параметры покрытий. В нашем случае применяемая нами для устранения воздействия первичного пучка ионов на подложку титановая диафрагма будет использоваться как распыляемая мишень (рис.16.10). На рис. 16.11 представлен внешний вид устройства, смонтированного в установке ВУ-1А, а на рис.16.12 – вид вторичного пучка.

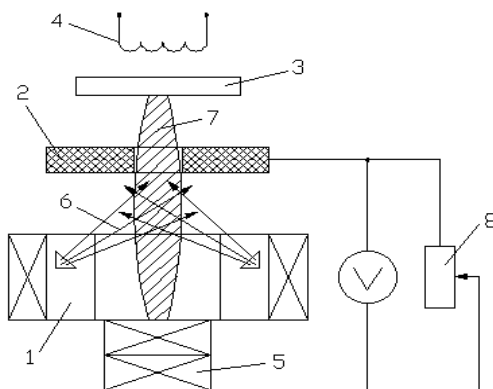


Рис.16.10. Схема процесса генерации потока ионов из пучкового фокуса: 1 - ионный источник, 2 - диафрагма из титан, 3 – подложка, 4 – нагреватель, 5 - дополнительный магнит, 6 - первичный ионный пучок, 7 - вторичный разряд, 8 - резистор

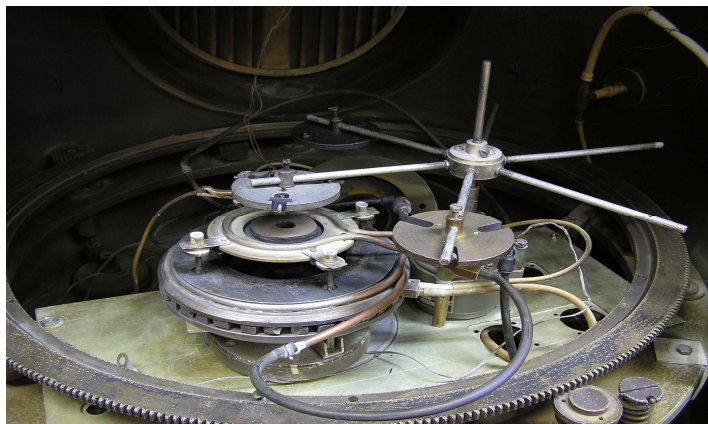


Рис.16.11. Внешний вид подколпачного устройства для формирования покрытий ионно-лучевым распылением в режиме ионно-пучкового фокуса

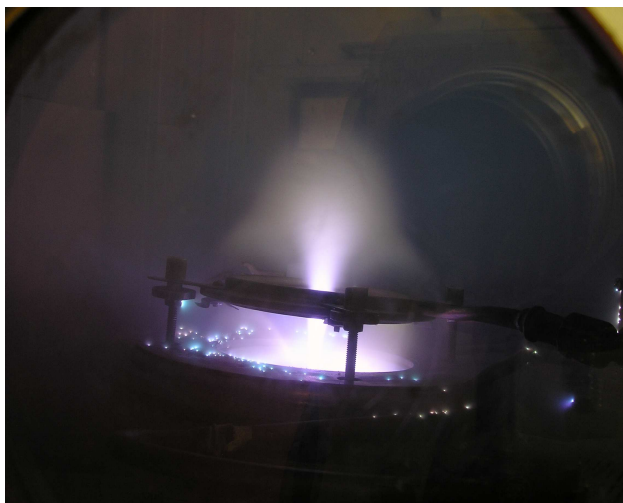


Рис.16.12. Внешний вид вторичного разряда

Проведены исследования влияния напряжения на диафрагме и тока разряда на скорость нанесения пленки титана при работе ионного источника в условиях ионно-пучкового фокуса. Результаты представлены на рис.16.13 и 16.14. Также было установлено, что

энергия ионов аргона и титана находилась в пределах 40–150 эВ, и увеличивалась с ростом напряжения на диафрагме.

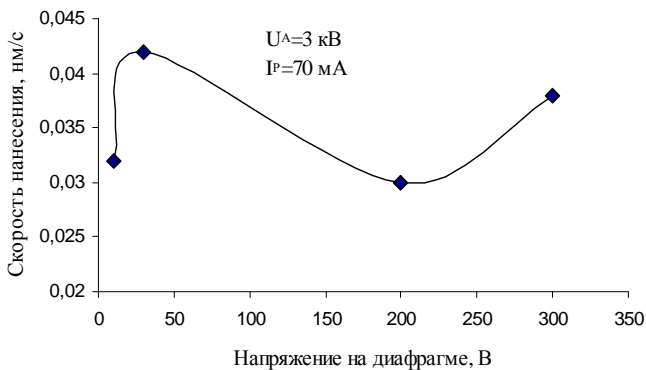


Рис. 16.13. Зависимость скорости нанесения от напряжения на диафрагме

Скорость нанесения возрастает с увеличением ускоряющего напряжения и тока разряда. В тоже время зависимость скорости нанесения от напряжения на диафрагме имеет немонотонный характер и находилась в пределах 0,03–0,045 нм/с.

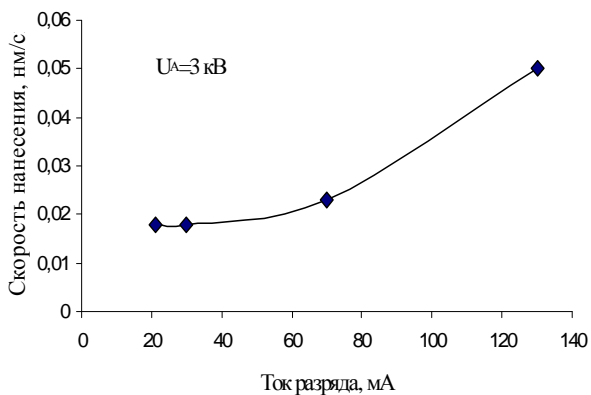


Рис.16.14. Зависимость скорости нанесения от тока разряда

Покрyтия из титана, нанесенные ионно-лучевым распылением в режиме ионно-пучкового фокуса на подложки из ПММА и целлюлозы, обладали высокой адгезией, что можно объяснить повышенной энергией конденсирующихся частиц.. О последнем свидетельствует значительный нагрев полимерных подложек, что требует их охлаждения. Поскольку скорость формирования покрытий незначительна, то целесообразно использовать данный метод лишь для нанесения тонкого подслоя, а дальнейшее наращивание толщины покрытия осуществлять магнетронным распылением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в монографии результаты были получены при выполнении Республиканских научно–исследовательских программ: (№ГР 0185007588) «Разработка научных основ стимуляции физико-химических процессов на поверхности и в переходных слоях твердотельных структур малой протяженности расфокусированными пучками ускоренных частиц» (1991–1995гг.), (№ ГР 19961159) «Разработка физико-химических основ получения и диагностирования высокоэнергетических нестационарных активных сред и процессов при создании ресурсосберегающих электронно-ионных технологий модификации поверхности неорганических и органических объектов» (1996–2000 гг.), (№ГР 19962415) «Разработка физико-математических и технологических основ модификации и исследования поверхностных и объемных свойств материалов и твердотельных структур с использованием концентрированных потоков энергии и частиц» (2001–2005 гг.), (№ ГР 20061892) «Разработка методов синтеза градиентных полислоистых структур на базе композиционных материалов, исследование их свойств и адаптация новых результатов к производству изделий электронной техники», проводимых в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники в период с 1991 по 2007 гг.

Авторы искренне благодарят сотрудников кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники за всестороннюю поддержку при выполнении научных исследований и дискуссии по обсуждаемым проблемам, а также генерального менеджера по внешнеэкономическим связям и развитию НПО «ИНТЕГРАЛ» Л.П. Ануфриева, начальника лаборатории сборки завода «ТРАНЗИСТОР» А.Ф. Керенцева и магистранта Ильина А.В. за плодотворную совместную работу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Валентинов, М. 50 лет транзистору / М. Валентинов // Электроника: Наука, Технология, Бизнес.– 1998. – № 1. – С. 23–25.
2. Гуськов, Г.Я. Монтаж микроэлектронной аппаратуры / Г.Я. Гуськов, Г.А. Блинов, А.А. Газаров. – М.: Радио и связь, 1986.– 176 с.
3. Кремниевые многокристалльные модули – приоритетное направление развития быстродействующих РЭА / А.С. Глухов [и др.] // Электронная промышленность. – 1994. – № 4 – 5. – С. 61 – 65.
4. Thwaites, C.J. Soldering technology - a decade of developments / C.J. Thwaites // Int. Metals. Rev. –1984. – V.29. – № 2. – P.45–74.
5. Григорьев, В.Н. ULTRA-FINE PITCH технология – что дальше / В.Н. Григорьев // Электронные компоненты. – 1997.– № 3-4.– С.16–18.
6. Ланин, В.Л. Пайка электронных сборок / В.Л. Ланин.– Минск: НИЭИ Министерства экономики, 1999. – 116 с.
7. Смирнов, В.И. Теория конструкций контактов в электронной аппаратуре / В.И. Смирнов, Ф.Ю. Матта. – М.: Советское радио,1974. – 176 с.
8. Кривошей, А.В. Пайка и сварка в производстве радиоэлектронной аппаратуры / А.В. Кривошей, А.Н. Бельцев. – М.: Энергия,1974. – 240 с.
9. Manko, H.H. Solders and Soldering, Materials, Design, Production and Analysis for Reliable Bonding / H.H. Manko. – N.Y.: McGraw Hill, 2001. – 719 p.
10. Максимихин, Б.А. Технологические процессы пайки электромонтажных соединений / Б.А. Максимихин. – Л.: Энергия, 1980. – 80с.
11. Медведев, А. М. Печатные платы. Конструкции и материалы / А.М. Медведев. – М.: Техносфера, 2005. – 304 с.
12. Григорьев, В.Н. ТМП корпуса интегральных схем и дискретных компонентов - состояния, перспективы развития / В.Н. Григорьев // Электронные компоненты. – 1997.– № 1–2(5). – С. 12–17.
13. Sade, M.G. Trends in MCM and Electronics Assembly / M.G. Sade, D.R. Gross // Hybrid Circuits. – 1994. – V.34. – № 5. – P.31–32.
14. Романченко, В. Intel, 65 нанометров – предстартовый отчет пошел / В. Романченко // <http://www.fera.ru>.
15. Медведев, А.М. Современные компоновки микросхем / А.М. Медведев // Компоненты и технологии. – 2007. – № 2.– С. 152–156.

16. Справочник по пайке / Под ред. И.Е. Петрунина.– М.: Машиностроение, 1984. – 400 с.
17. Socolowski, N. Lead free alloys and limitations for surface mount assembly / N. Socolowski // Proceedings of Surface Mount International. – 1995. – P. 477–480.
18. Keeler, R. Specialty solders outshine tin/lead in problem areas /R. Keeler // EP&P. – 1987. – № 7. – P. 45–47.
19. Seelig, K. A study of lead free solder alloys /K. Seelig // Circuit Assembly. – 1995. – № 11. – P. 46–48.
20. Melton, C. How good are lead free solders / C. Melton // SMT. – 1995. – № 6. – P. 32–36.
21. Бессвинцовые припой и их свойства // Электронные компоненты. – 2004. – № 11. – С. 36–37.
22. Медведев, А.М. Бессвинцовые технологии монтажной пайки /А.М. Медведев // Электронные компоненты. – 2004. – №11. – С. 29–34.
23. Чистяков, Ю.Д. Физико-химические пути повышения надежности соединений, паянных легкоплавкими припоями /Ю.Д. Чистяков, Г.А. Яковлев // Обзоры по электронной технике. Сер. Технология, организация производства и оборудование. Вып. 2(625).– М.: ЦНИИ «Электроника», 1979. – 41 с.
24. Bader, W.G. Lead Alloys for High Temperature Soldering of Magnet Wire / W.G. Bader// Welding Journal. – 1975. –V. 54. – № 10. – P. 106–111.
25. Buene, L. Interdiffusion and phase formation at room temperature in evaporated gold-tin films /L. Buene // Thin Solid Films. – 1977. –V. 47. – № 1. – P. 156–166.
26. Новикова, С.И. Тепловое расширение твердых тел / С.И. Новикова – М.: Наука, 1974. – 232 с.
27. Агеев, П.Ф. Исследование некоторых физико-механических свойств припоев в процессе термоциклирования / П.Ф. Агеев // Электротехническая промышленность. Сер. Преобразовательная техника. – 1970. – Вып. 3. – С. 8–10.
28. Bangs, E.R. Effect of Low Frequency Thermal Cycling on the Crack Susceptibility of Soldered joints / E.R Bangs, R.E. Beal // Welding Journal. – 1975. – V. 54. – № 10. – P. 113–119.
29. Lang, G.A. Thermal Fatigue in Silicon Transistors / G.A. Lang, B.I. Fehder, W.D. Williams // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1970. –V. 17. – 9. – P. 787–793.
30. Ловцов, Д.В. Влияние качества паяных контактов на циклоустойкость и тепловое сопротивление силовых

- полупроводниковых приборов /Д.В. Ловцов // Электротехническая промышленность. Сер. Преобразовательная техника. – 1975.– Вып.5(64). – С. 8–9.
31. Портной, К.И. Дисперсноупрочненные материалы / К.И. Портной, Б.Н. Бабич.– М. : Металлургия, 1974. – 325с.
 32. Denslow, G.A. Ultrasonic Soldering / G.A. Denslow // Wire J. – 1976.– V. 9.– № 9. – P. 131 – 136.
 33. Клубович, В.В. Ультразвуковая пайка в радио- и приборостроении / В.В. Клубович, М.Д. Тявловский, В.Л. Ланин. – Минск: Наука и техника, 1985. – 263 с.
 34. Большаков, А. Флюсы на водной основе. Новые возможности пайки волной припоя / А. Большаков // Технологии в электронной промышленности. – 2006. – № 4.– С. 78–79.
 35. Гафт, С. Новые требования к технологическому сборочному оборудованию при переходе к бессвинцовым технологиям / С. Гафт // Поверхностный монтаж. – 2006. – № 7–8(53). – С.6–10.
 36. Harding, W.B. Solderability Testing / W.B. Harding // Plating. – 1965.– № 10. – P. 970–981.
 37. Ланин, В.Л. Исследование паяемости гальванических покрытий токопроводящих элементов электронной аппаратуры / В.Л. Ланин, А.А. Хмыль, Л.К. Кушнер // Вопросы проектирования и производства РЭА и электрорадиоизделий: Сб. научн. трудов /Моск. ин-т радиотехники, электроники и автоматики. – М., 1988. – С. 74-79.
 38. Ланин, В.Л., Оценка паяемости электронных компонентов и деталей в электронике/ В.Л. Ланин // Технологии в электронной промышленности. – 2008. – № 2. – С. 74–79.
 39. Lea, C. A Scientific Guide to Surface Mount Technology / C.A. Lea. – Buckingham: Electrochemical Publ. Ltd., 1988. – 569 p.
 40. Джюд, М. Пайка при сборке электронных модулей / М. Джюд, К. Бриндли. Пер. с англ.– М.: Издательский Дом «Технологии», 2006. – 416 с.
 41. Wassink, K.R.J. Soldering in Electronics / K.R.J. Wassink. – Ayr, Scotland: Electrochem. Publ., 2002. – 285 p.
 42. Mackay, D. The Meniscograph: A Method of Solderability Measurement / D. Mackay // Circuits Manufacturing. – 1974. – V. 13. – № 7. – P.52–56.
 43. Бородина, Е.К. Контроль паяемости металлических покрытий / Е.К. Бородина, М.Г. Крашенинников // Заводская лаборатория. – 1989. – Т. 55. –№ 11.– С. 80–82.

44. Ланин, В.Л. Контроль паяемости выводов элементов радиоэлектронной аппаратуры / В.Л. Ланин, А.А. Хмыль // Неразрушающий контроль и системы управления качеством сварных и паяных соединений: Материалы семинара / Центральный Российский Дом знаний. – М., 1992. – С.140 – 143.
45. Индуктивный преобразователь: а.с. 57837 СССР, МКИ 3 G 01 B 7/02/ В.Л. Ланин, Л.Я. Мартыненко / № 2625866/25-28; Заявл. 02.06.1978. Опубл. 23.08.1980 // Открытия. Изобретения. – 1980.– № 31. – С. 158.
46. Панченко, П.В. Ультразвуковой метод определения способности припоя к смачиванию при пайке / П.В. Панченко // Прикладная акустика. – 1977.– №5. – С. 168–172.
47. Rothschild, V.F. Electroplating of Solder able Coatings / V.F. Rothschild // Metal Progress. – 1981.– V. 119. – № 7. – P. 25–29.
48. Паяемость серебряного покрытия / Д.Г. Коваленко [и др.] // Обмен опытом в радиопромышленности. – 1972. – Вып. 7.– С. 27–29.
49. Давыдова, А.М. Паяемость оловянно–цинковых и оловянно–висмутовых гальванических покрытий / А.М. Давыдова // Обмен опытом в радиопромышленности. – 1972. – Вып. 7.– С. 28–30.
50. Хмыль, А.А. Сравнительная эффективность гальванических покрытий корпусов интегральных схем и микросборок / А.А. Хмыль, В.Л. Ланин, В.А. Емельянов // Обзорная информ.– Минск: БелНИИНТИ, 1983. – 47 с.
51. Оценка паяемости гальванических покрытий токопроводящих элементов электронной аппаратуры / В.А. Емельянов [и др.] // Электронная техника. Сер 7 «Технология и организация производства». – 1990.– Вып. 3(160). – С.68–71.
52. Ланин, В.Л. Свариваемость и паяемость композиционных серебряных покрытий для изделий электронной техники / В.Л. Ланин, Л.К. Кушнер, В.М. Бондарик // Матер. Междунар. конф.: “ELECTRONICS- 2000”. Каунас: КПИ.– 2000. – С.19-22.
53. Thwaites, C.J. Solderability of Coating for Printed Circuits / C.J. Thwaites // Trans. of the Inst. of Metal Finishing. – 1965. – V. 43. – P. 143–152.
54. Автоматизация и механизация сборки и монтажа узлов на печатных платах / А.В. Егунов [и др.]; под ред. В.Г. Журавского. – М.: Радио и связь, 1988.– 280 с.
55. Масич, П. Входной контроль компонентов: контроль паяемости методом оценки баланса смачивания / П. Масич, Е. Кашин // Поверхностный монтаж.– 2007. – № 9(62).– С.12–13.

56. Макаревич, А.И. Ультразвуковое лужение деталей и элементов РЭА / А.И. Макаревич, В.Л. Ланин // Обмен опытом в радиопромышленности. – 1981. – № 12. – С. 10 – 12.
57. Роговский, В. Ф. Бесфлюсовое лужение выводов микросхем с помощью ультразвука / В.Ф. Роговский // Техника средств связи. Сер. Технология пр-ва и оборудов.– 1977.– Вып. 2 (3).– С. 115 – 116.
58. Vargol, S. Focus on photoimagable solder masks // S. Vargol // Electron Packaging and Prod. –1986. – V.26. – № 6.– P. 87–89.
59. Смертина, Т. Технология нанесения и обработки жидких защитных паяльных масок / Т. Смертина // Технологии в электронной промышленности. – 2005. – № 6. – С.41– 47.
60. Гржимальский, Л.Л. Технология и оборудование пайки / Л.Л. Гржимальский, И.И. Ильевский. – М.: Машиностроение, 1979. – 240 с.
61. Schaufler, K. Rationalisieren Industrieller Lotprozesse mit Induktiven Erwärmungsanlagen / K. Schaufler // Brown Boveri Mitt. – 1972. – № 5. – S. 231–235.
62. Ланин, В.Л. Эффективность нагрева концентрированными потоками энергии при пайке в электронике / В.Л. Ланин // Электронная обработка материалов. – 2002. – № 2. – С. 17– 20.
63. Автоматизация пайки печатных плат / С.Л. Буслович [и др.].– М.: Энергия, 1976. – 217с.
64. SMD Pick and Place and Repair Stations Reflow Soldering Systems Screen Printers / Prospect Funk@ Meier AG, Switzerland, 1987.– 3р.
65. Установка монтажа поверхностно-монтируемых компонентов СТ-508 / Проспект ЦКБ “Спектр”, Беларусь, 1990. – 2с.
66. Татур, Т.А. Основы теории электромагнитного поля / Т.А. Татур.– М.: Высшая школа. – 1989. – 271 с.
67. Вологдин, В.В. Индукционная пайка / В.В. Вологдин, Э.В. Куц. – Л.: Машиностроение, 1979. – 80 с.
68. Ключко, Н.А. Основы технологии пайки и термообработки твердосплавного инструмента / Н.А. Ключко. – М.: Металлургия, 1981.– 200 с.
69. Простяков, А.А. Индукционные нагревательные установки / А.А. Простяков. – М.: Энергия, 1970. – 120с.
70. Рикетс, Л.У. Электромагнитный импульс и методы защиты / Л.У. Рикетс, Д.Э. Бриджес, Дж. Майлетта. – М.: Атомиздат, 1979. – 328 с.
71. Ланин, В.Л. Особенности высокочастотного нагрева при герметизации пайкой корпусов БИС / В.Л. Ланин, М.Д. Тявловский

- // Электронная техника Сер. 7 ТПО. –1980.– Вып. 3 (100). – С. 11–14.
72. Слухоцкий, А.Е., Рыскин С.Е. Индукторы для индукционного нагрева / А.Е. Слухоцкий, С.Е. Рыскин. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.
73. Коган, М.Г. Расчет индукторов для нагрева тел вращения /М.Г. Коган. – М.: ВНИИЭМ, 1966. – 59с.
74. Zina, S. Elements of Induction Heating: Design, Control, and Application / S. Zina, S.L. Semiatin. – Ohio: ASM International, 1988. – 335 p.
75. Ланин, В.Л. Активация процессов пайки корпусов микроэлектронных изделий электромагнитными высокочастотными колебаниями / В.Л. Ланин // Радиотехника и электроника. – Минск: МРТИ. – 1983.– Вып.12. – С. 122–125.
76. Автоматизация технологических процессов герметизации миниатюрных приборов индукционной пайкой / В.И. Вайнштейн [и др.] //Совершенствование техники и технологии сварки в радиоэлектронике и приборостроении: Материалы семинара. – Л.: ЛДНТП,1986. – С. 49–54.
77. Индуктор для ВЧ нагрева : а.с. 302853 СССР. МКИ Н 05b 5/18, В 23k 13/00 / Н.Ф. Глебоко, В.Ф. Юрин, В.А. Жестовский.–№ 1408806/25–27; заявл. 23.11.1971; опубл. 28.11.1971 // Бюл. изобр. – 1971. – №15.
78. Полуавтоматы для высокочастотной пайки окон выводов энергии/ Н.И. Сажин [и др.] // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. –1994. – Вып 7(441). – С. 58–59.
79. Шапошников, О.А. Высокотемпературная индукционная пайка в электровакуумном приборостроении/ О.А. Шапошников, Ю.А. Курдин.-- М.:ЦНИИ «Электроника».– 1982.– 40 с.
80. Дворянчиков, В.Г. Растекание высокотемпературных припоев по поверхности нержавеющей стали в высоком вакууме при индукционном нагреве / В.Г. Дворянчиков, О.А. Шапошников // Электронная техника. Сер.7. – 1982. – Вып. 2(111).– С. 26–30.
81. Способ пайки: а.с. № 941039 СССР. МКИ В 23К 1/06. / Ю.А. Курдин, Ю.Л. Чернышов, В.Г. Дворянчиков В.Г., О.А. Шапошников. – № 2512103/25-27; заявл. 01.08.1977; опубл. 07.07.1982// Бюл. изобр.– 1982. – № 25. – С. 30.
82. Смирнов, Г.Н. Прогрессивные способы пайки алюминия / Г.Н. Смирнов. – М.: Металлургия, 1981. – 240 с.

83. Зворыкин, Д.В. Применение лучистого инфракрасного нагрева в электронной промышленности. / Д.В. Зворыкин, Ю.Н. Прохоров. – М.: Энергия, 1980. – 176 с.
84. Опарин, М.И. Светолучевая пайка электрорадиоэлементов на печатные платы / М.И. Опарин, Н.А. Коробко, Н.С. Пронин // В сб.: Ресурсосберегающие технологии, качество и надежность паяных соединений. – М.: МДНТП, 1988. – С. 29–33.
85. Григорьянц, А.Г. Лазерная сварка металлов / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов; Под ред. А.Г. Григорьянца.– М.: Высшая школа, 1988. – 207 с.
86. Реди, Дж. Промышленные применения лазеров: Пер с англ. / Дж. Реди.– М.: Мир 1981. – 468 с.
87. Веденов, А.А. Физические процессы при лазерной обработке материалов / А.А. Веденов, Г.Г. Глацун.– М.: Энергия, 1985.– 225 с.
88. Самаркин, Ю.Д. Лазерная пайка в производстве изделий электронной техники / Ю.Д. Самаркин, Л.А. Сурменко. – М.: ЦНИИ Электроника, 1986. – 68 с.
89. Применение низкоэнергетических электронных пучков в технологии производства полупроводниковых приборов/ А.Н. Комов [и др.] // Электронная техника. Сер.7. – 1982.– Вып.4(113). – С.61–63.
90. Андожский, С.О. Использование ионных потоков в качестве энергоносителя / С.О. Андожский, Л.А. Радченко, Е.И. Генералов // Техника и технология сварки в радиоэлектронике и приборостроении: Матер. семинара. Л.:ЛДНТП, 1983. – С.54–59.
91. Петрунин, И.Е. Пайка металлов / И.Е. Петрунин, С.Н. Лоцманов, Г.А. Николаев.– М.: Металлургия, 1973. – 280 с.
92. Peter, H.- J. Neuere Anwendungsmöglichkeiten des HF-Induktionslotens / H.- J. Peter // Schweiss Technik. – 1971. – № 7. –S. 289–293.
93. Loten mit induktiven Erwärmungsanlagen // Schweiz Maschinenmarkt.– 1973.– № 21. – S . 117–119.
94. Benkowsky, G. Grundlagen der Induktionserwärmung / G. Benkowsky // Elek.–Prakt.– 1974.–Bd. 28.– № 8. – S. 265–268.
95. Справочник по пайке / Под ред. С. Н. Лоцманова, И.Е. Петрунина В.П. Фролова.– М.: Машиностроение, 1975.– 407 с .
96. Лашко, С.В. Пайка металлов / С.В. Лашко, Н.Ф. Лашко. – М.: Машиностроение, 1988. – 376 с.
97. Шибалов, М.В. Пайка с кристаллизацией под давлением / М.В. Шибалов. – М.: Металлургия, 1980.– 68 с.

98. Никитинский, А.М. Пайка алюминия и его сплавов / А.М. Никитинский. – М.: Машиностроение, 1983. – 192 с.
99. Петрунин, И.Е. Металловедение пайки / И.Е. Петрунин, И.Ю. Маркова, А.С. Екатова. – М.: Металлургия, 1976. – 264 с.
100. Яшин, А.А. Конструирование микроблоков с общей герметизацией / А.А. Яшин. – М.: Радио и связь, 1985. – 100 с.
101. Филатов, И.Н. Микроэлектронные СВЧ–устройства / И.Н. Филатов, О.А. Бакрунов, П.В. Панасенко. – М.: Высшая школа, 1987. – 94 с.
102. Горбенко, Н.Л. Присоединение плат ГИС к основаниям / Н.Л. Горбенко, В.И. Попов, Т.В. Сидорова // Электронная техника. Сер. Материалы. – 1984. – Вып. 7(192). – С. 3– 8.
103. Цыкин, А.В. Повышение надежности несогласованных соединений микрополосковых плат с корпусами СВЧ модулей при циклических температурных воздействиях / А.В. Цыкин, Г.А. Яковлев // Обзоры по электронной технике. Сер. Технология, организация производства и оборудование. Вып.12(1476). – М.: ЦНИИ Электроника, 1989. – 56 с.
104. Доровских, С. Применение технологии поверхностного монтажа в производстве гибридно-интегральных модулей СВЧ / С. Доровских // Компоненты и технологии. – 2006. – № 7. – С. 170–171.
105. Пайка микрополосковых устройств низкотемпературными припоями без применения флюса / В.И. Бейль [и др.] // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. – 1982. – Вып. 5(341). – С. 39–42.
106. Бейль, В.И. Влияние НЧ колебаний на структуру и свойства паяных соединений при низкотемпературной пайке без применения флюсов / В.И. Бейль, Ф.Н. Крохмальник, Н.Г. Отмахова // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. – 1982. – Вып. 9(345). – С. 57–60.
107. Бейль, В.И., Групповая пайка микрополосковых плат на металлические основания / В.И. Бейль, Н.Г. Отмахова, И.Н. Сажин // Электронная техника. Сер. 10. – 1986. – Вып. 3 (387). – С. 70–73.
108. Бесфлюсовая пайка на воздухе труднопаяемых материалов припоями Al–Ge, Al–Si и Al–Ge–Si / Г.А. Яковлев [и др.] // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. – 1982. – Вып. 9(345). – С. 60–63.
109. Яковлев, Г.А. Исследование надежности соединений феррит–металл, паяных легкоплавкими припоями / Г.А. Яковлев // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. – 1984. – Вып. 12(372). – С. 39–45.

110. Способ ультразвуковой пайки и лужения: а. с. 89426 СССР. МКИ³ В 23 К 1/06. / М. Д. Тявловский, В.Л. Ланин, Ю. М. Зак, В. Н. Копылов. № 2934478/25-27; Заявл. 29.05.80. Оpubл. 30.12.81. Бюл. Открытия. Изобретения. – 1981.– № 48. – С. 44.
111. Ланин, В.Л. Активация монтажа СВЧ микросборок и многофункциональных модулей ультразвуковой и электромагнитной энергией / В.Л. Ланин // Современные средства связи: Материалы 9-й Междунар. науч.-техн. конф. – Нарочь. – 2004. – № 2(18)/2. – С. 148–150.
112. Ланин, В.Л. Технология монтажа микроплат в корпуса многофункциональных модулей / В.Л. Ланин // Технологии в электронной промышленности.– 2008. – № 4. – С. 45–48.
113. Монтаж СВЧ микрополосковых устройств / Л.Б. Рогачевский [и др.] // Электронная техника. Сер. 7.– 1978.– Вып. 4(89). – С. 105–109.
114. Герметизация сваркой и пайкой корпусов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / А.П. Ляшок [и др.] // Обзоры по электронной технике. Сер.7.– Вып.8(488). – М.: ЦНИИ Электроника, 1977. – 60 с.
115. Федоров, А.В. Герметизация микросборок / А.В. Федоров, Ю.А. Витер, А.Ф. Рыборак // Обмен опытом в радиопромышленности. – 1979. – Вып. 5. – С. 39–40.
116. Герметизация блоков аппаратуры с применением принудительного конвективного охлаждения термочувствительных элементов / В.Б. Звягин [и др.] // Обмен производственно-техническим опытом. – 1988. – Вып. 6. – С. 18–20.
117. Frye, J. Solder and Soldering Tools / J. Frye // Electronics World. – 1971. – V. 85.– № 6. – P.45–48,65.
118. Электрический паяльник: а.с. 1625608 СССР / Д. В. Снисарчук. – Оpubл. в Б. И. 1991. – №5.
119. Афанасьев, В. R/PL650– третье поколение ремонтных центров от фирмы ERSA. / В. Афанасьев / Поверхностный монтаж.– 2006.– №1(48).– С. 8–12.
120. Кудрик, В.Г. Компьютерный контроль температуры паяльных станций / В.Г. Кудрик, В.Л. Ланин // Известия Белорусской инженерной академии. – 2003. – № 1(15)/4 . – С. 147–149.
121. Тренисов, И. Паяльные станции со 100% точностью поддержания температуры / И. Тренисов // Поверхностный монтаж. – 2005.– № 6–7(43).– С. 10–12.

122. Karpel, S. PCB Soldering equipment-an update / S. Karpel // Tin and its Uses. – 1986. – №148. – P.4–9.
123. Lambert, L. Air knives Have an Edge on Solder defect Control / L. Lambert // Electron Packaging and Prod. –1984. –V.24. – №2. – P. 178–179.
124. Филор, У. Надежность процесса для бессвинцовой технологии / У. Филор, К. Цабель // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – № 4. – С. 56–58.
125. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Гл. редактор И.П. Голямина. – М.: Сов. энциклопедия. – 1979. – 400 с.
126. Кнэпп, Р. Кавитация / Р. Кнэпп, Дж. Дэйли, Ф. Хэммит. – М.: Мир, 1974. – 686 с.
127. Маргулис, М.А. Звукохимические реакции и сонолюминесценция / М.А. Маргулис. – М.: Химия, 1986. – 288 с.
128. Сиротюк, М.Г. Экспериментальное исследование ультразвуковой кавитации / М.Г. Сиротюк // В кн. : Мощные ультразвуковые поля. – М.: Наука, 1968. – С. 167–220.
129. Агранат, Б.А. Ультразвук в порошковой металлургии / Б.А. Агранат, А.П. Гудович, Л.Б. Неженко. – М.: Металлургия, 1986. – 168 с.
130. Зарембо, Л.К. Введение в нелинейную акустику / Л.К. Зарембо, В.А. Красильников. – М.: Наука, 1966. – 519 с.
131. Флинн, Г. Физика акустической кавитации в жидкостях. – В кн.: Методы и приборы ультразвуковых исследований / Г. Флинн; под ред. У. Мэзона. – М.: Мир, 1967, т. 1, ч. Б. – С. 7–186.
132. Асташкин, Ю. С. Кавитационная прочность и пороги акустической кавитации в расплавах металлов / Ю.С. Асташкин. – В кн.: Повышение эффективности технологических процессов в поле акустических колебаний. – М: Металлургия, 1981. – С. 26–33.
133. Физика и техника мощного ультразвука. Кн. 2. Мощные УЗ поля / Л.Д. Розенберг [и др.]; под ред. Л. Д. Розенберга. – М.: Наука, 1968. – 266 с.
134. Шутилов, В.А. Основы физики ультразвука / В.А. Шутилов. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. – 280 с.
135. Алефиренко, В. М. Динамика кавитационных полостей в расплавах припоев / В.М. Алефиренко, В.Л. Ланин, М.Д. Тявловский // Вестн АН БССР. Сер. физ.-техн. наук. – 1987. – № 1. – С. 125.
136. Ультразвуковая технология / Б.А. Агранат [и др.]; под ред. Б. А. Аграната. – М.: Металлургия, 1974. – 504 с.

137. Stereoscopic high-speed recording of bubble filaments / J. Appel [ets] // *Ultrasonic Sonochemistry*. – 2003. – № 11. – P. 39–43.
138. Эльпинер, И. Е. Ультразвук. Физико-химическое и биологическое действие / И.Е. Эльпинер. – М.: Физматгиз, 1963. – 420 с.
139. Коновалов, Е. Г. Ультразвуковой капиллярный эффект / Е.Г. Коновалов, И.Н. Германович // Докл. АН БССР. – 1962. – Т. 6.– № 8. – С. 492–493.
140. Прохоренко, П.П. Ультразвуковой капиллярный эффект / П.П. Прохоренко, Н.В. Дежкунов, Г.Е. Коновалов. – Минск: Наука и техника, 1981. – 135 с.
141. Прохоренко, П. П. Подъем жидкости в капилляре при наличии кавитации / П.П. Прохоренко, Н.В. Дежкунов // Повышение эффективности технологических процессов в поле акустических колебаний: труды МИСиС.– М.: Металлургия, 1981. – С. 46–50.
142. Коновалов, Е. Г. Исследование явлений, возникающих в зоне соединения при наложении ультразвуковых колебаний / Е.Г. Коновалов, Ж.С. Воробьева, А.Ф. Канищев // Прочность и пластичность материалов в ультразвуковом поле: материалы конф.– Ч. 2. –Минск, 1973. – С. 57–59.
143. Коновалов, Е. Г. Методика измерения вязкости расплавов припоев, облученных ультразвуком / Е.Г. Коновалов, Ж.С. Воробьева // Докл. АН БССР. – 1974. – Т. 28. – № 5. – С. 408–409.
144. Корнфельд, М. Вспучивание жидкости под действием ультразвука / М. Корнфельд, Н. Молохова // Докл. АН СССР. – 1995. – Т. 105, № 3. – С. 476.
145. Румак, Н. В. Динамика захлопывания кавитационных полостей в жидкостях и расплавах / Н.В. Румак, В.Л. Ланин, В.М. Бондарик // Весці АН Беларусі. Сер. фіз.-техн. наук. – 1996. – № 1. – С. 115–118.
146. Ланин, В. Л. Ультразвуковая активация дозированных объемов припоя / В.Л. Ланин, М.Д. Тявловский // Весці АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1988. – № 2. – С. 59–62.
147. Прохоренко, П.П., Пугачев С.И., Семенова Н.Г. Ультразвуковая металлизация материалов / П.П. Прохоренко, С.И. Пугачев, Н.Г. Семенова; под ред. В.А. Лабунова. – Минск: Наука и техника, 1997. – 271 с.
148. Воздействие мощного ультразвука на межфазную поверхность металлов / О.В. Абрамов [и др.]. – М.: Наука, 1986.– 277 с.

149. Турбин, В.В. Оптимизация технологии ультразвуковой пайки / В.В. Турбин, В.А. Ильичев, И.И. Лабунина // Пайка алюминиевых конструкций: материалы семинара. – М.: МДНТП, 1990. – С. 35–36.
150. Ланин, В. Л. Исследование ультразвуковых микропотоков в жидкостях и расплавах/ В.Л. Ланин, М.Д. Тявловский // Доклады АН БССР. – 1984. – Т. 28. – № 5. – С. 427–429.
151. Ультразвуковые процессы в производстве изделий электронной техники. В 2 т. Т.2 / С. П. Кундас [и др.]; под ред. А.П. Достанко. – Минск: Бестпринт, 2003. – 224 с.
152. Лашко, Н. Ф. Контактные металлургические процессы при пайке / Н.Ф. Лашко, С.В. Лашко. – М.: Металлургия, 1977. – 192 с.
153. Петрунин, И. Е. Физико–химические процессы при пайке /И.Е. Петрунин. – М.: Высш. школа. – 1972. – 280 с.
154. Стаховский, С.С. Бесфлюсовая герметизация плоских корпусов интегральных схем / С.С. Стаховский, А.Я. Сорокин, З.М. Славинский // Электронная техника. Сер. 7. – 1974. – Вып. 4(62). – С. 97–100.
155. Теслин, Г.П. Пайка с применением вибраций / Г.П. Теслин, Л.В. Рощина, С.Н. Лоцманов. – Л.:ЛДНТП 1967. – 23 с.
156. Книжник, Г.С. Влияние вибраций на свойства и структуру паяных швов / Г.С. Книжник, Г.П. Теслин // Автоматическая сварка.– 1967.– № 1.– С. 47–48.
157. Исследование оптимальных режимов при ультразвуковом лужении алюминия / Г.Е. Вирозуб [и др.] // Прикладная акустика: Труды ТРТИ. – 1971. –Вып. 25.– С. 237–243.
158. Долгов, Ю.С. Вопросы формирования паяного шва / Ю.С. Долгов, Ю.Ф. Сидохин. – М.: Машиностроение, 1973. – 136 с.
159. Ланин, В.Л. Феноменологические модели поверхностных явлений при формировании паяных соединений / В.Л. Ланин // Современная радиоэлектроника: научные исследования, подготовка кадров: труды Международной научно-практической конференции. Ч.1. Минск, 10–11 апреля 2007 г. – С.174–177.
160. Гладков, А. С. Пайка деталей электровакуумных приборов / А.С. Гладков, О.П. Подвигина, О.В. Чернов. – М.: Энергия, 1967. – 288 с.
161. Долгов, Е. Н. Исследование ультразвуковой металлизации титановых и алюминиевых сплавов / Е.Н. Долгов. Автореф. дис. канд. техн. наук. Л.: СЗПИ, 1971.– 20 с.
162. Френкель, Я. И. Введение в теорию металлов / Я.И. Френкель. – Л.: Наука, 1972. – 424 с.

163. Абрамов, О. В. Кристаллизация металлов // Физические основы ультразвуковой технологии / О.В. Абрамов, И.И. Теумин; под ред. Л. Д. Розенберга. – М.: Наука, 1970.– С. 427–514.
164. Павлова, М. А. Роль поверхностных явлений в процессе соединения керамики с металлом пайкой под давлением / М.А. Павлова, И.И. Метелкин, К.В. Викман // Смачиваемость и поверхностные свойства расплавов и твердых тел.– Киев: Наукова думка, 1972. – С. 281–284.
165. Дохов, М.П. Температурная зависимость смачиваемости пьезокерамики оловом, свинцом и их сплавами/ М.П. Дохов, В.И. Розов, М.Х. Повежев // Физика межфазных явлений. Нальчик, 1980. – С. 156–159.
166. Ахматов, А. С. Молекулярная физика граничного слоя / А.С. Ахматов. – М.: Физматгиз, 1963. – 472 с.
167. Алиева, М.П., Гликман Е.Э., Горюнов Ю.В. Влияние некоторых физико-химических факторов на смачивание алюминиевых сплавов легкоплавкими припоями при воздействии ультразвука и др./ М.П. Алиева, Е.З. Гликман, Ю.В. Горюнов // Физика и химия обработки материалов. –1973. – №1. – С. 130–136.
168. Коновалов, Н.Т. Низкотемпературная ультразвуковая металлизация на воздухе трудно смачиваемых материалов / Н.Т. Коновалов, Э.В. Кистерев, О.В. Абрамов // Основные направления развития ультразвуковой техники и технологии на период 1981–1990 гг.: тез. докл.конф. Суздаль, 1982. – С. 44.
169. Тявловский, М. Д. Ультразвуковая пайка и металлизация неметаллических материалов в технологии РЭА / М.Д. Тявловский, В.Л. Ланин // Перспективные направления в технологии радиоаппаратостроения. Л.: ЛДНТП, 1979. – С. 36–40.
170. Архангельский, М. Е. Воздействие акустических колебаний на процесс диффузии / М.Е. Архангельский // Успехи физических наук. –1967.– Т. 92.– №2. – С. 182–205.
171. Архангельский, М. Е. Диффузия в гетерогенных системах / М.Е. Архангельский, Ю.Г. Статников // Физические основы ультразвуковой технологии / Под ред. Л. Д. Розенберга.– М.: Наука, 1970.– С. 515–578.
172. Абрамов, О. В. Ультразвуковая обработка бинарных сплавов /О.В. Абрамов // Применение ультразвука в машиностроении– Минск: Наука и техника, 1964. – С. 10-14.
173. Ощепков, С. А. Воздействие ультразвуковых колебаний на структуру некоторых легкоплавких сплавов / С.А. Ощепков, О.З.

- Цапская // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1975. – №1. – С. 71–72.
174. Кардашев, Г. А. Теплообменные акустические процессы и аппараты / Г.А. Кардашев, П.Е. Михайлов. – М.: Машиностроение, 1973. – 223 с.
175. Преснов, В. А. Основы техники и физики спая / В.А. Преснов, Ю.Б. Новодворский, М.П. Якубена. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 1961. – 236 с.
176. Стеклоэмалевые и стеклокерамические конденсаторы / В. Д. Пономаренко [и др.]. – М.: Энергия, 1972. – 160 с.
177. Тявловский, М. Д. Припой для ультразвуковой металлизации стеклокерамических материалов / М.Д. Тявловский, В.Л. Ланин // *Электронная техника. Сер. 6.* – 1979. – Вып. 1 (126). – С. 19–21.
178. Тявловский, М. Д. Исследование физико-механических свойств и структуры металлосплавов со стеклокерамическими материалами, полученных ультразвуковой металлизацией / М.Д. Тявловский, В.Л. Ланин // *Электронная техника. Сер. 6.* – 1981 – Вып. 4 (141). – С. 3–5.
179. Эпштейн, С. А. Измерение характеристик конденсаторов / С.А. Эпштейн. – М.- Л.: Энергия, 1965. – 236 с.
180. Конников, С. Г. Электронно-зондовые методы исследования полупроводниковых материалов и приборов / С.Г. Конников, А.Ф. Сидоров. – М.: Энергия, 1978. – 136 с.
181. Пугачев, С. И. Экспериментальное исследование пограничной области пьезокерамика–металл при ультразвуковой металлизации / С.И. Пугачев // *Технологические применения ультразвука: материалы к краткосрочному семинару.* – Л.: ЛДНТП, 1968. – С. 79–84.
182. Абрамов, О.В. Ультразвуковая металлизация пьезокерамики оловянно–цинковыми припоями / О.В. Абрамов, С.А. Зверьков, Я.Н. Оганян // *Ультразвуковые методы воздействия на технологические процессы.* – М.: Металлургия, 1961. – С. 59–63.
183. Тявловский, М. Д. Процесс формирования металлических сплавов со стеклокерамическими материалами при воздействии ультразвука / М.Д. Тявловский, В.Л. Ланин // *Вестн. АН БССР. Сер. физ.-техн. наук.* – 1981. – № 1. – С. 51–55.
184. Chamber, W. F. Electron microprobe studies of metal-ceramic braze joints / W.F. Chamber, P.F. Hlava // *11th Annu. Conf. Microbeam Anal. Soc., Miami Beach., Fla.* – 1976. – P. 54A–54E.

185. Шиляев, А.С. Ультразвуковая обработка расплавов при производстве и восстановлении деталей машин / А.С. Шиляев. – Минск: Наука и техника, 1992. – 176 с.
186. Гуров, К.П. Диффузионные процессы при пайке, сварке и эксплуатации полупроводниковых приборов, ИС и ГИС / К.П. Гуров, А.В. Гусев, Г.А. Яковлев. – М.: ЦНИИ «Электроника», 1988. – 70 с.
187. Ланин, В.Л. Моделирование процессов формирования соединений материалов в ультразвуковых полях / В.Л. Ланин // Доклады БГУИР. – 2004. – № 4. – С. 79–83.
188. Ланин, В.Л. Моделирование процессов диффузии при совместном воздействии ультразвуковых и электромагнитных полей / В.Л. Ланин // Доклады НАН Беларуси. – 2005. – Т.5.– № 1. – С. 52–55.
189. Румак, Н.В. Электрические эффекты в жидкостях и расплавах под воздействием ультразвуковых колебаний / Н.В. Румак, В.М. Бондарик, В.Л. Ланин // Доклады АН Беларуси. – 1994. – Т. 3. – № 2. – С. 115–118.
190. Lanin, V.L. Electrical phenomena's in liquids and melts by ultrasound processing / V.L. Lanin // Proc. 3-rd Conf. on Applications o Power Ultrasound in Physical and Chemical Processing. 13–14 December 2001.– Paris. – 2001.– P. 143–146.
191. Способ ультразвуковой очистки: патент 7318 Беларусь, МКИ 7 В 08 В 3/12 / Л.П. Ануфриев, В.Л. Ланин В.Л № А 20020988, Заявл. 16.12.2002, Опубл. 16.05. 2005 // Афiцiйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. – 2005.– № 3(46). – С. 135.
192. Коваленко, В.Г. Использование электрокапиллярных движений для выявления режима процессов взаимодействия жидкого штейна со шлаком / В.Г. Коваленко, Ю.П. Никитин // Физическая химия поверхностных явлений в расплавах.– Киев: Наукова думка. – 1971. – С.67–71.
193. Бергман, Л. Ультразвук и его применение в науке и технике / Л. Бергман. – М.: Изд-во иностр. литературы, 1957. – 726 с.
194. Применение ультразвука в промышленности / Г.С. Ангелов [и др.]; под ред. А.И. Маркова. – М.: Машиностроение, София: Техника.– 1975.– 240 с.
195. Матаушек, И. Ультразвуковая техника / И. Матаушек. – М.: Металлургиздат, 1962.– 511 с.
196. Апухтин, Г.И. Пайка алюминия и его сплавов с применением ультразвука / Г.И. Апухтин. – М.: Изд-во АН СССР, 1956. – 18 с.

197. Гершгал, Д.А. Ультразвуковая технологическая аппаратура / Д.А. Гершгал, В.М. Фридман. – М.: Энергия, 1976.– 320 с.
198. Донской, А.В. Ультразвуковые электротехнологические установки / А.В. Донской, О.К. Келлер, Г.С. Кратыш. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 208 с.
199. Ультразвуковой паяльник: а. с. 179399 СССР / В. В. Ганрио, А. В. Гудков. – Опул. в Б. И., 1966. – №5.
200. Ультразвуковой паяльник: а. с. 216861 СССР / А. В. Стамов–Витковский, В. Н. Гинин, Б. Т. Мамат и др. – Опул. в Б. И., 1968.– №15.
201. Паяльник для ультразвуковой пайки: а. с. 519200 (СССР). / Г. В. Дружинин, Г. Д. Борисов, В. Б. Клейменов, В. И. Батищев. – Опул. в Б. И., 1976. – №24.
202. Способ ультразвуковой обработки материалов и устройство для его осуществления: а. с. 766790 (СССР). / В. Л. Венгринович, В. М. Колешко. – Опул. в Б. И., 1980. – № 36.
203. Паяльник для пайки и распайки: а. с. 766775 СССР / Г. Е. Коновалов, Н. В. Дежкунов, А. Р. Баев и др. Опул. в Б. И., 1980.– № 36.
204. Ультразвуковой паяльник: а. с. № 831447 СССР. МКИ В 23 К 3/02, В 23 К 1/06. /В. Л. Ланин, М. Д. Тявловский// Заявка№ 2735333/25-27. Заявл. 12.03.79. Опул. 23.05.81 // Открытия. Изобретения.– 1981. – № 19. – С. 53.
205. Ультразвуковой паяльник: а. с. 1186416 СССР. МКИ⁴ В 23 К 3/02. /В. Л. Ланин, М. Д. Тявловский, И.Н. Дунай. – № 3725708-25-27. Заявл. 13.04.84. Опул.23.10.85. Бюл.№ 39 // Открытия. Изобретения.– 1985. – № 39. – С. 67.
206. Устройство для ультразвуковой пайки труб: а. с. 1311881 СССР. МКИ⁴ В 23 К 3/06. / В.К. Станишевский, А.А. Кособуцкий, А.Э. Паршуго, В.А. Крапивницкий, В. Л. Ланин.– № 3856732/31-27. Заявл. 20.02.85. Опул.23.05.87. Бюл. № 19 // Открытия. Изобретения. – 1987. – № 19. – С. 55.
207. Пайка алюминиевых телескопических соединений / В.Л. Ланин [и др.] // Радиопромышленность. – 1994. – № 2. – С. 28–32.
208. Ланин, В. Л. Ультразвуковое лужение деталей и элементов РЭА / В.Л. Ланин, А.И. Макаревич // Обмен опытом в радиопромышленности. – 1981. – Вып. 12. – С.10–12.
209. Graff, K. Macrosonics in Industry: Ultrasonic Soldering /K. Graff // Ultrasonics. – 1977. – V. 15. – № 2. – P. 75 – 81.
210. Пат. 53 – 40179 (Япония).

211. Пат. 54 – 30655 (Япония).
212. Пат. 54 – 2243 (Япония).
213. Пат. 57 – 64473 (Япония).
214. Пат. 4358044 (США).
215. Устройство ультразвукового лужения изделий: пат. 2022734 Россия, МКИ⁶ В 23К 3/06. / В.Л. Ланин, А.Ч. Черепович. – № 5039932/-08; Заявл. 28.04.92; Оpubл.15.11.94. Бюл. № 21 // Изобретения. – 1994. – № 21. – С. 51.
216. Свергунов, В.Ф. Локальное ультразвуковое лужение выводов радиоэлементов / В.Ф. Свергунов, В.Л. Ланин, И.Н. Чернышевич // Электронная промышленность. – 1994. – № 6. – С. 43–44.
217. Ланин, В.Л. Автоматизация ультразвукового лужения деталей и электрордиоэлементов / В.Л. Ланин, А.А. Хмыль // Автоматизация и внедрение прогрессивных процессов пайки в приборостроении и радиоэлектронике: материалы семинара. – Л.: ЛДНТП. – 1988. – С. 21–25.
218. Дорошкевич, В.В. Ультразвуковое лужение выводов элементов РЭА / В.В. Дорошкевич, В.Л. Ланин, А.А. Хмыль // Обмен производственно-техническим опытом. – 1988. – № 11. – С. 17–19.
219. Универсальная установка индукционной пайки / О. А. Шапошников [и др.] // Электронная техника. Сер. 7. – 1981. – Вып. 6 (109). – С. 27 – 29.
220. Долгов, Е. Н. Ультразвуковая металлизация титановых и алюминиевых сплавов / Е.Н. Долгов, С.И. Пугачев, Э.В. Тарат // Технология судостроения. – 1971. – № 4. – С. 53 – 55.
221. Новицкий, Б.Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах / Б.Г. Новицкий. – М.: Химия, 1983. – 191 с.
222. Тризна, Ю. П. Ультразвуковая пайка плат / Ю.П. Тризна // В кн.: Новые материалы и технология пайки в машиностроении.– М.: ЦП НТО Машпрома, 1971.– С. 131 – 135.
223. Аньев, О. Г. Использование ультразвука для лужения и пайки полупроводниковых приборов / О.Г. Аньев, Л.М. Тищенко, Г.А. Андросов // Электронная техника. Сер. 10. – 1970. – Вып. 1(33).– С. 34 – 40.
224. Winkler, G. Unterstutzung des Weichlotprozesses dursh Ultraschall / G. Winkler // ZIS – Mitt. – 1975. – Bd. 17. – N4.– S. 395 – 403.
225. Няньковский, Л. А. Ультразвуковой преобразователь для бесфлюсового лужения радиодеталей / Л.А. Няньковский // В кн.:

- Новые разработки в ультразвуковой технике и их промышленное применение.– Л.; ЛДНТП, 1977. – С. 89 – 91.
226. Способ гиперзвуковой микросварки и пайки: а. с. 743815 СССР / В. М. Колешко, А. В. Гулай. – Огубл. в Б. И., 1980. – № 24.
227. Ланин, В.Л. Бесфлюсовая пайка в электронике/ В.Л. Ланин // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – № 3. – С. 16–20.
228. Трегубов, С.В. Устройство для ультразвукового лужения заготовок /С.В. Трегубов, М.Д. Тявловский, В.Л. Ланин // Обмен производственно-техническим опытом. – 1986. – Вып. 7. – С. 41 – 42.
229. Официальный сайт МРТЗ [Электронный ресурс]. – 2006. – Режим доступа: <http://www.mrtz.ru>
230. Сайт компании Utinlab [Электронный ресурс]. – 2006. – Режим доступа: <http://www.utinlab.ru>
231. Сайт компании Sonic solder [Электронный ресурс]. – 2007. – Режим доступа: <http://www.sonicsolder.com>
232. Сайт компании Advanced Sonics [Электронный ресурс]. – 2007. – Режим доступа: <http://www.advancedsonics.com>
233. Chu, D.W. Maskless flip chip solder bumping technique. / D. W. Chu, D. S. Shen // Proc. of 43rd Electronic Components and Technology Conference, IEEE: N.Y.– 1993. – P. 610–614.
234. Reflowable Sn-Pb bump formation on Al pad by a solder bumping method. / T. Ogashiwa, T. Arikawa, H. Murai, A. Inoue, T. Masumoto // Proc. of 45th Electronic Components Technology Conference, IEEE: N.Y. – 1995. – P. 1203–1208.
235. Inava, M. Solder Bump Formation Using Electroless Plating and Ultrasonic Soldering / M. Inava, K. Yamakawa, N. Iwase // IEEE Trans. on Components, Hybrids, and Manufac. Technology. – 1990. – V. 13. – № 1. – P. 119–122.
236. Бесфлюсовый способ лужения металлов: а. с. 383553 СССР / Г. Е. Вирозуб, С.В. Лашко, П.С. Кобзарёв. Огубл. в Б.И., 1973.–№ 24.
237. Исследование оптимальных режимов при ультразвуковом лужении алюминия /Г. Е. Вирозуб [и др.] // Прикладная акустика. – 1971. – Вып. 4. – С. 237 – 243.
238. Ланин, В. Л., Тявловский М. Д. Исследование ультразвуковой бесфлюсовой пайки подложек гибридных интегральных схем в корпусе микросборок / В.Л. Ланин, М.Д. Тявловский // Доклады АН БССР.– 1982 . – Т. 2. – № 11.– С. 1008 – 1010.

239. Saxty, P. Ultrasonic soldering in the electronics industry. / P. Saxty // Metallurgia. – 1995. – № 62(8). – P. 287.
240. Vianco, P. T. Ultrasonic soldering for structural and electronic applications. / P. T. Vianco, F. M. Hosking, J. A. Rejent // Welding Journal. – 1996. – № 5(11). – P. 343–355.
241. Способ облуживания керамических деталей: а. с. 104267 СССР / В. Ф. Захаров. – Оpubл. в Б. И., 1956. – № 9.
242. Способ лужения и пайки изделий из керамики, абразивов, ферритов и т.п. материалов: а. с. 116865 СССР / В. В. Ганрио, В. П. Зельдин. – Оpubл. в Б. И., 1958. – № 12.
243. Ганрио, В. В. Ультразвуковое лужение и пайка керамики / В.В. Ганрио // Обмен опытом в радиоэлектронной промышленности. – 1961. – № 9. – С. 1–14.
244. Ганрио, В. В. Исследование механической прочности ультразвукового спая / В.В. Ганрио // Обмен опытом в радиопромышленности. – 1967. – № 9. – С. 1–8.
245. Захаров, К. Д. Ультразвуковая пайка стекла, керамики и ферритов / К.Д. Захаров // В кн.: Применение ультразвука в технологии машиностроения. – М.: ЦИНТИ, 1960. – С. 142 – 145.
246. Ощепков, С. А., Цапская О. З. Некоторые вопросы исследования ультразвуковой металлизации керамики / С.А. Ощепков, О.З. Цапская // Электронная техника. Сер. 7. – 1974. – Вып. 1 (59). – С. 28 – 29.
247. Металлизация радиотехнической керамики под действием ультразвука / В.Н. Дроздов [и др.] // В кн.: Вопросы схемотехники, конструирования и технологии радиоэлектронной аппаратуры. – Минск: Полымя, 1975. – С. 114 – 115.
248. Гудков, А. В. Аппаратура для ультразвуковой металлизации / А.В. Гудков // Обмен опытом в радиопромышленности. – 1967. – № 1. – С. 26 – 29.
249. Пугачев, С. И. Металлизация пьезокерамики с применением ультразвука / С.И. Пугачев // Технология судостроения. – 1964. – № 5. – С. 100 – 103.
250. Пугачев, С. И. Экспериментальное исследование пограничной области пьезокерамика–металл при ультразвуковой металлизации / С.И. Пугачев // В кн.: Технологические применения ультразвука: Материалы к краткосрочному семинару. Л.: ЛДНТП, 1968. – С. 79–84.
251. Ультразвуковая металлизация пьезокерамики оловянно-цинковыми припоями / О. В. Абрамов [и др.] // В кн.:

- Ультразвуковые методы воздействия на технологические процессы. М.: Металлургия, 1961. – С. 59–63.
252. Ультразвуковая металлизация и пайка для технологии приборостроения / Под ред. А. В. Гудкова. – Обзор по материалам отечественной и зарубежной печати за 1966 – 1974 гг. – М.: ЦНТИ «Поиск», 1975. – 58 с.
253. Ланин, В. Л. Влияние вида ультразвуковых колебаний на прочность спаев со стеклокерамическими материалами / В.Л. Ланин, М.Д. Тявловский // Весці АН БССР. Сер. фіз. – тэхн. навук. – 1983. – № 4. – С. 69 – 73.
254. Ланин, В.Л. Новые методы ультразвуковой металлизации и пайки керамических и стеклокерамических материалов / В.Л. Ланин, М.Д. Тявловский // Экспресс-информация. Сер. Радиотехника, электроника, электросвязь. – Минск: БелНИИНТИ, 1980. – 22 с.
255. Припой для лужения и пайки керамики и стеклокерамики: а. с. 612767 (СССР). / В. Л. Ланин, М. Д. Тявловский. – Оpubл. в Б. И., 1978.– № 24.– С.31.
256. Lanin, V.L. Ultrasonic Soldering in Electronics / V. L. Lanin // Ultrasonics Sonochemistry. – 2001.– № 8. – P. 379–385.
257. Гусева, Е.В. Ультразвуковая металлизация сополимеров стирола / Е. В. Гусева, Е. Н. Долгов, С. И. Пугачев // Технология судостроения. – 1971. – № 6. – С. 50 – 52.
258. Деленковский, Н. В. Ультразвуковая металлизация плотных модификаций нитрида бора / Н.В. Деленковский // В кн.: Основные направления развития ультразвуковой техники и технологии на период 1981 – 1990 годы. Суздаль, 1982. – С. 43.
259. Способ металлизации керамики: а. с. 833884 СССР / П. П. Прохоренко, Н. В. Деленковский, Н. В. Дежкунов, И. В. Стойчева. – Оpubл. в Б. И., 1981. – № 20.
260. Прохоренко, П. П. Ультразвуковая пропитка графита легкоплавкими припоями / П.П. Прохоренко, И.В. Стойчева, Н.В. Деленковский // Весці АН БССР. Сер. фіз. – энерг. навук. – 1977. – № 4. – С. 121 – 123.
261. Гусева, Е.В. К природе воздействия ультразвука на соединение разнородных материалов при ультразвуковой металлизации / Е. В. Гусева, Е. Н. Долгов, С. И. Пугачев // Технология судостроения. – 1972. – № 3. – С. 84 – 87.
262. Jung, H. Kim Soldering Method Using Longitudinal Ultrasonic / Jung H. Kim, Jihye Lee, Choong D. Y. // IEEE Transactions on components and packaging technologies. – 2005. – № 28(3). – P. 493 – 498.

263. Bondarik, V. M. New Process Assembly of an Electronic Packaging / V.M. Bondarik, V.L. Lanin, A.A. Khmyl // Scientific Reports. Journal of the University of Applied Sciences. – Mittweida. – 1998– № 5.– P. 17–182.
264. Ланин, В.Л. Пайка изделий электронной техники при комбинированном воздействии концентрированных потоков энергии / В.Л. Ланин, В.М. Бондарик // Современное состояние пайки: материалы семинара. – М.: ЦРДЗ, 1999. – С. 64–67.
265. Бондарик, В.М. Физическая модель комбинированной ультразвуковой пайки / В.М. Бондарик, В.Л. Ланин // Ультразвуковая техника и технология: материалы II Междунар. конф. 17–19.11. 1999. – Минск: БАТУ. – С. 115–119.
266. Lanin, V.L. Electrical resistance of soldering joints at effect of ultrasonic oscillations / V.L. Lanin, V.M. Bondarik // Proc. of the 20th Int. Conf. on Electrical Contacts. 19–23 June 2000. Stockholm, Sweden. – 2000. – P. 205 – 208.
267. Ланин, В.Л. Особенности формирования паяных соединений в ультразвуковых и электрических полях / В.Л. Ланин, В.М. Бондарик // Современные проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: материалы Междунар. научн.-техн. семинара. – Новополюцк, 2000. – С.16–19.
268. Lanin, V.L. Electrical phenomena's in liquids and melts by ultrasound processing / V.L. Lanin // Proc. 3-rd Conf. on Applications o Power Ultrasound in Physical and Chemical Processing. 13–14 December 2001. Paris. – 2001.– S. 143–146.
269. Вологдин, В.В. Индукционная пайка / В.В. Вологдин, Э.В. Куш, В.В. Асамов.– Л.: Машиностроение, 1989. – 72 с.
270. Лозинский, М.Г. Промышленное применение индукционного нагрева / М.Г. Лозинский.– М.: АН СССР, 1958.– 741 с.
271. Бабат, Г.И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение / Г.И. Бабат.– М.: Энергия, 1965. – 552 с.
272. Curtis, F.W. High-Frequency Induction Heating / F.W. Cirtis. – N.Y.: McGraw-Hill Book Comp., 1944. –235 p.
273. Вологдин, В.П. Поверхностная индукционная закалка / В.П. Вологдин.– М.: Оборонгиз, 1947.– 325 с.
274. Induction Heating. Industrial Applications / Ed. by S. Lupi. – Paris, U.I.E., 1992. – 142 p.
275. Немцов, В.С. Теория и расчет устройств индукционного нагрева / В.С. Немцов, В.Б. Демидович. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.

276. Шамов, А.Н. Проектирование и эксплуатация высокочастотных установок / А.Н. Шамов, В.А. Бодажков. – Л.: Машиностроение, 1974. – 120 с.
277. Слухоцкий, А.Е. Индукторы для индукционного нагрева / А.Е. Слухоцкий, С.Е. Рыскин. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.
278. Ключко, Н.А. Основы технологии пайки и термообработки твердосплавного инструмента / Н.А. Ключко. – М.: Металлургия, 1981. – 200 с.
279. Inductionserwärmungs-anlage // Praktiker. –1998.– Bd. 50. – №1. – S. 33.
280. Anlagentechnik // Praktiker. – 1997.– Bd. 49. – №12. – S. 578.
281. Фогель, А.А. Индукционный метод удержания жидких металлов во взвешенном состоянии / А.А. Фогель. – Л. : Машиностроение, 1989. – 80 с.
282. Schaufilter K. Rationalisieren industrieller Lotprozesse mit induktiven Erwärmungsanlagen / K. Schaufilter // Brown Boveri Mitt. – 1972. – Bd. 59. – № 5. – P. 231–235.
283. Benkowsky, G. Grundlagen der Induktionserwärmung / G. Benkowsky // Elektro-Praktiker. – 1974.– Bd. 28. – № 8. – P. 265–268.
284. Синкевич, В.Ф. Физические механизмы деградации полупроводниковых приборов / В.Ф. Синкевич, В.Н. Соловьев // Зарубежная электронная техника . – 1984. – № 2. – С. 3–46.
285. Ланин, В.Л. Высокочастотный электромагнитный нагрев в процессах пайки электронных устройств / В.Л. Ланин // Электронная обработка материалов. – 2004. – № 5. – С. 79–84.
286. Ланин, В.Л. Герметизация интегральных микросхем электромагнитным нагревом / В.Л. Ланин, А.А. Черник // Известия Белорусской инженерной академии. – 2000. – № 1(9)/2.– С. 132–133.
287. Thwaites, C. J. Soldering technology a decade of development / C.J. Thwaites // Int. Met. Rev. – 1984. – V. 29. – № 2. – P. 45–74.
288. Лысенко, В.Г. Программное устройство для управления процессом индукционной пайки / В.Г. Лысенко, В.Г. Дворянчиков, Б.А. Маренко // Электронная техника. Сер.7. – 1979. – Вып.3(94). – С. 40–44.
289. Voge, V.R. Induktiven Weichloten von Elektromechanischen Wandlers / V.R. Voge // ZIS – Mitt. –1983. –V. 24. – № 4. – P. 355–359.
290. Способ пайки деталей: а. с. 554118 СССР. МКИ² В 23 К 31/02, Н 05 В 5/02. / М. Д. Тявловский, А. А. Хмыль, В. К. Станишевский, В. Л. Ланин. – № 2125663/27; заявл. 18.11.1975; опубл. 15.04.1977 // Бюл. / Открытия. Изобретения. – 1977. – № 14.– С. 42.

291. Способ высокочастотной пайки деталей: а. с. 603512 СССР. МКИ² В 23К 1/00, Н 05 К 3/34. / М. Д. Тявловский, В. К. Станишевский, В. Л. Ланин, В.М. Будницкий. – № 2365464/27; заявл. 25.05.76; опубл. 06.04.78 // Бюл. / Открытия. Изобретения. – 1978. – № 15.– С. 41.
292. Ланин, В.Л. Активация процессов формирования контактных соединений в изделиях электроники в электромагнитных полях // Вестник Полоцкого государственного университета / В.Л. Ланин.– 2004.– № 11. – С. 75–78.
293. Интенсификация процессов формирования твердотельных структур концентрированными потоками энергии / Под общ. ред. А.П. Достанко, Н.К. Толочко. – Минск: Бестпринт, 2005.– 682 с.
294. Ланин, В.Л. Высокочастотный электромагнитный нагрев для пайки электронных устройств / В.Л. Ланин // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – № 5. – С. 46–49.
295. Ланин, В. Л. Бесконтактные вибрации в процессах высокочастотного электромагнитного нагрева / В.Л. Ланин // Технологии в электронной промышленности. – 2008. – № 3. – С. 43–45.
296. Ланин, В.Л. Применение электромагнитного нагрева для процессов пайки электронных устройств / В.Л. Ланин, А.А. Черник, И.Н. Чернышевич // Современные проблемы проектирования и производства РЭС: мат. докл. междунар. науч.–техн. семинара, Новополоцк: ПГУ, 2000. – С. 29–31.
297. Способ пайки изделий: пат. 2686 Беларусь, МКИ⁶ В23К 1/06, 1/02, Н05В 6/02. / В.Л. Ланин, И.Н. Чернышевич, В.М. Бондарик. – № 1004; заявл. 08.11.1993; опубл. 20.10.98 // Бюл. / Афіцыйны бюл. / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. – 1998. – № 1. – С. 101.
298. Устройство высокочастотного нагрева деталей: а. с. 738198 СССР. МКИ³ В 23К 3/04, Н 05 В 5/18. / В. Л. Ланин, М. Д. Тявловский, А.Н. Сохор.– № 2523864/24-07; заявл. 08.09.77; опубл. 06.06.80 // Бюл. // Открытия. Изобретения. – 1980. – № 20.– С. 331.
299. Ланин, В.Л. Автоматизация процессов пайки в радиоэлектронике / В.Л. Ланин, А.А. Хмыль // Автоматизация и внедрение прогрессивных процессов пайки в радиоэлектронике, приборостроении и машиностроении: материалы семинара. – Л.: ЛДНТП, 1990. – С. 26–31.
300. Способ групповой пайки выводов разъема: а. с. 549900 СССР. МКИ² Н 05 К 3/34. / В. К. Станишевский, В. Л. Ланин, М. Д. Тявловский.– № 2179706/21; заявл. 13.10.75; опубл. 29.06.77 // Бюл. /Открытия. Изобретения.– 1975.– № 9.– С. 201.

301. Ланин, В.Л. Моделирование высокочастотного электромагнитного нагрева в процессах пайки электронных устройств / В.Л. Ланин // Известия Белорусской инженерной академии. – 2002. – № 2(14)/2. – С. 167–169.
302. Ланин, В.Л. Моделирование устройств низко- и высокочастотного электромагнитного нагрева для формирования электрических соединений / В.Л. Ланин // Известия Белорусской инженерной академии. – 2003. – № 1(15)/4. – С. 143–145.
303. Авсиевич, И.В. Особенности электромагнитного нагрева изделий малых размеров / И.Е. Авсиевич, В.Л. Ланин // Весті АН Беларусі. Сер. фіз.–тэх навук. –1995. – № 1. – С. 33–35.
304. Установки индукционного нагрева / А.Е. Слухоцкий [и др.] – Л.: Энергия.– 1981.– 328 с.
305. Высокочастотные установки для нагрева металлов ВЧИ–4–10 и ВЧИ –4–10 Т // Информ. листок ВНИИЭМ–ИНФОРМЭЛЕКТРО. № 15.02.04– 70.– 1970.– 2 с.
306. Березин, М.И. Высокочастотные генераторы для индукционного нагрева / М.И. Березин // Обзоры по электронной технике. Сер. ТОПО. – 1975. – Вып. 10(317). – 56 с.
307. Установка индукционной пайки // Информ. листок ВИМИ №82-1777.– М.: ВИМИ, 1982.– 2с.
308. Variable temperature high frequency induction heating soldering iron : pat. 5408072 USA, МКИ⁶ Н 05 в 6/14 / N. Takashi. – 2.02.1994. – 18.04.1995.
309. Сайт компании Argus <http://www.argus-x.ru/catalog/payal/365/>
310. Асамов, В.В. Индукционная пайка в электротехнической промышленности / В.В. Асамов, В.В. Вологдин, Э.В. Куш // Электротехника. – 1981.– № 7. – С. 43–45.
311. Опыт высокочастотной пайки контактных узлов электроаппаратов/ П.Е. Базырин, В.В. Вологдин, Э.В. Куш и др. // Труды ВНИИТВЧ. – 1975. – Вып.15. – С. 109 – 114.
312. Peter, H.J. Wirtschaftliches HF Induktionsloten von Hydraulikrohren mit Schutzgasklappinduktoren / H.J. Peter // Schweibtechnik. – 1983.– № 4.– S. 166–168.
313. Apparatus and method for heating reduced portions of adjacent workpieces: pat. 3251976 USA, H05B 5/02 / E. F. McBrien., 17.05.1966.
314. Induction Soldering makes the Connection // Circuits Manufacturing. – 1972. – V. 12. – № 7. – P. 24.
315. Авсиевич, И.В. Высокочастотная плавка микропорошков металлов в вакууме / И.В. Авсиевич, В.Л. Ланин // Современные проблемы

- проектирования и производства радиоэлектронных средств: материалы Междунар. науч.-техн. семинара. – Новополоцк, 2002. – С.128–131.
316. Ланин, В.Л. Особенности высокочастотного нагрева при герметизации пайкой корпусов БИС / В.Л. Ланин, М.Д. Тявловский // Электронная техника. Сер.7. – Вып.3(100). – 1980. – С. 11–14.
317. Тявловский, М.Д. Исследование распределения электромагнитного поля индукторов при нагреве корпусов микросборок из диамагнитных материалов / М.Д. Тявловский, В.Л. Ланин // Весці АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1982. – № 3.– С. 70–72.
318. Ланин, В.Л. Исследования высокочастотной пайки корпусов микросборок из диамагнитных сплавов / В.Л. Ланин, М.Д. Тявловский // Доклады Академии наук БССР. – 1981.– Т. 25. – № 10. – С. 911–913.
319. Ланин, В.Л. Активация процессов пайки корпусов микроэлектронных изделий электромагнитными высокочастотными колебаниями / В.Л. Ланин // Радиотехника и электроника. – Минск: МРТИ. – 1983.– Вып.12. – С. 122–125.
320. Зак, Ю.М. Выбор формы индуктора для герметизации корпусов СВЧ - модулей высокочастотной пайкой / Ю.М. Зак, В.Л. Ланин, М.Д. Тявловский // Электронная техника. Сер.1. – 1982.– Вып. 9(345) – С. 63–65.
321. Ланин, В.Л. Воздействие электромагнитного поля на параметры изделий электроники при высокочастотном нагреве / В.Л. Ланин, М.М. Кречко // Известия Белорусской инженерной академии. –2005. –№1(19)/5.– С. 139–141.
322. Ланин, В.Л. Современные процессы пайки в производстве радиоэлектронной аппаратуры / В.Л. Ланин, А.А. Хмыль // Обзорная информация. Сер. Электроника. Радиотехника. – Минск: БелНИИНТИ, 1988.– 60 с.
323. Ланин, В.Л. Сравнительная оценка эффективности индукторов для электромагнитного нагрева изделий / В.Л. Ланин, И.В. Авсиевич // Доклады Академии наук Беларусі.–1995. – Т. 39. – № 6. – С. 114–116.
324. Румак, Н.В. Экономичный бесконтактный нагрев энергией переменного магнитного поля / Н.В. Румак, В.Л. Ланин, И.Н. Чернышевич // Весці АН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук.– 1994.– №2. – С.94–96.

325. Ивницкий, Б.Я. Методика расчета температурного режима наплавки и пайки ТВЧ деталей сложной формы / Б.Я. Ивницкий // Сварочное производство. – 1984. – №1. – С. 5–7.
326. Измерение параметров индукторов установок индукционного нагрева на режимах, близких к номинальным / Ю. Болотовский [и др.] // Силовая электроника. – 2005. – № 1. – С. 104–106.
327. Борхерт, Р. Техника инфракрасного нагрева / Р. Борхерт, В. Юбиц. – М.-Л. : Госэнергоиздат, 1963. – 325 с.
328. Левитин, И.Б. Инфракрасная техника / И.Б. Левитин. – Л.: Энергия, 1973. – 160 с.
329. Прохоров, Ю.И. Лучистый инфракрасный нагрев в полупроводниковом и микроэлектронном производстве / Ю.И. Прохоров, Ю.П. Ирошников // Обзоры по электронной технике. Серия: Микроэлектроника, вып. 9(156). – М.: ЦНИИ «Электроника», 1973. – 76 с.
330. Термическое оборудование полупроводникового и микроэлектронного производства с лучистым инфракрасным нагревом / Д.Б. Зворыкин [и др.] // Обзоры по электронной технике. Серия: Полупроводниковые приборы, вып. 11(331). – М.: ЦНИИ «Электроника», 1975. – 85 с.
331. Баранов, В.Н. Техника лучистого нагрева в электронном производстве / В.Н. Баранов, Ю.В. Большаков, В.И. Иванов // Обзоры по электронной технике. Серия: Микроэлектроника, вып. 1(347). – М.: ЦНИИ «Электроника», 1976. – 56 с.
332. Герметизация сваркой и пайкой корпусов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / А.П. Ляшок [и др.] // Обзоры по электронной технике. Серия: Технология, организация производства и оборудование, вып. 8(488). – М.: ЦНИИ «Электроника», 1977. – 60 с.
333. Norman, R. C. Near IR Reflow Soldering of Surface Mounted Devices / R.C. Norman // Surface Mount Technology. – 1986. – №10. – P. 27–30
334. Никифоров, Г.Д. Перспективы эффективного использования светового луча для сварки и пайки / Г.Д. Никифоров, С.А. Федоров, В.В. Овчинников // Сварочное производство. – 1982. – № 8. – С. 15–17.
335. Зернов, И.А. Применение кварцевых ламп накаливания в процессах пайки / И.А. Зернов, А.А. Белов, В.С. Бульбутенко // В сб.: Ресурсосберегающие технологии, качество и надежность паяных соединений. – М.: МДНТП, 1988. – С. 99–102.

336. Корунов, Ю.И. Пайка печатных плат концентрированным световым лучом / Ю.И. Корунов, Н.В. Шиганов, Н.А. Баресков // Сварочное производство.–1980. – № 11.– С. 16–17.
337. Зворыкин, Д.Б. Отражательные печи инфракрасного нагрева /Д.Б. Зворыкин.– М.: Машиностроение, 1985.– 176 с.
338. Holloman, J.K. Soldering for Present and Future Surface Mount Applications / J. K. Holloman // ELECTRI Onics. –1985. – V. 31.– № 9.– P. 26–30.
339. Мэнгин, Ч. Технология поверхностного монтажа / Ч. Мэнгин, С. Макклелланд. – М.: Мир, 1990. –276 с.
340. Технология поверхностного монтажа / С.П. Кундас [и др.] – Минск: Армита, 2000. – 350 с.
341. Costello, D.J. Flat Pack Reflow Soldering with Focused Infrared / D.J. Costello, E. L. Rlyo / Insul. Circuits. – 1970. –V.16. – № 10.– P. 67–72.
342. Henderson, I. IR plus Hot Platen Heating Offers Another Option for Reflow Soldering / I. Henderson // EPP. – 1989.–V.29.–№ 9.– P. 78–80.
343. Никифоров, Г.Д. Сварка и пайка световым лучом / Г. Д. Никифоров, М.И. Опарин, С.А. Федоров.– М.: Машиностроение, 1979. – 40 с.
344. Миронов, Л.Г. Опыт применения сфокусированной лучистой энергии дуговых ксеноновых ламп для пайки изделий / Л.Г. Миронов, Г.П. Раваев, В.Ф. Петухов // Новые достижения в области пайки.– Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1981.– С. 116–120.
345. Галахов, Н.В. Применение оптического источника нагрева с дуговыми ксеноновыми лампами для пайки выводов электрорадиоэлементов на печатные платы / Н.В. Галахов, М.И. Опарин, В.С. Мамаев // Совершенствование технологии пайки в радиоэлектронике и приборостроении.– Л.: ЛДНТП.–1982.– С. 30–34.
346. Волков, П.Г. Пайка корпусов электровакуумных приборов световым лучом / П.Г. Волков, В.С. Мамаев, Н.А. Коробко // Сварочное производство. – 1993. – № 4.– С. 16.
347. Коробко, Н.А. Поверхностный монтаж радиоэлементов на печатные платы световым лучом ксеноновых ламп / Н.А. Коробко, М.И. Опарин, Н.С. Пронин // Приборы и системы управления.– 1991.– № 8.– С. 41– 42.
348. Ланин, В.Л. Инфракрасный нагрев в технологии пайки поверхностного монтажа / В.Л. Ланин // Технологии в электронной промышленности.– 2007.– № 3.– С. 38–42.

349. Новоселов, В. ERSA для бессвинцовой пайки сегодня и завтра / В. Новоселов // Технологии в электронной промышленности. – 2005. – № 4. – С. 44–48.
350. Сайт компании «Остек» www.ostec.ru/smt
351. Установка ИК пайки печатных узлов “SMD–TRASSA–5607”. Проспект ЦНИТИ «Техномаш–Трасса», 1990.– 1 с.
352. Reflow Soldering Using Selective Infrared Radiation / S. Seiki, U. Hiroki, W. Isao, N. Katsuchide, S. Takehico // Proc. Intern. Electronic Manuf. Technology Symposium, 1995. – P. 393–396.
353. Соловьев, А. Hotflow 2– серия печей оплавления для бессвинцовой пайки / А. Соловьев // Технологии в электронной промышленности.– 2005.– № 5.– С. 72–75.
354. Белов, А.А. Лучевой высокотемпературный паяльник с кварцевой лампой накаливания / А.А. Белов, В.С. Бульбутенко // Сварочное производство. – 1983. – № 7. – С. 41.
355. Ланин, В.Л., Инфракрасный нагрев в технологии поверхностного монтажа / В.Л. Ланин, В.В. Капралов // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: материалы III Международной НТК, т. 1. – Новополоцк, 2004. – С.81 – 84.
356. Apparatus and method for soldering electronic components to printed circuit boards / P. Mashkov, T. Pencheva, D. Popov, V. Gyoch // 28th Intern. Spring Seminar on Electronics Technology: meeting the Challenges of Electronics Technology Progress, 2005.– P. 420–425.
357. Двусторонний поверхностный монтаж микромодулей АТС “Бета”/ Р.С. Кадемик, В.Л. Ланин, А.М. Яскович, А.Н. Хилькевич // Известия Белорусской инженерной академии. – 2002. – № 2(14)/2.– С. 165–166.
358. Ланин, В.Л. Двусторонний поверхностный монтаж электронных модулей / В.Л. Ланин, А.Н. Хилькевич // Известия Белорусской инженерной академии.– 2003. – № 1(15)/4.– С.145–147.
359. Видеков, В.Х. Формирование межсоединений при двухстороннем поверхностном монтаже / В.Х. Видеков, В.Л. Ланин, Т.Г. Георгиева // Доклады БГУИР.– 2007.– № 2(18). – С. 101– 105.
360. Багдасаров, Х.С. Технологический лазер на кристаллах ИАГ мощностью 1 кВт / Х.С. Багдасаров, В.В. Дьяченко, Е.А. Федоров // Автоматическая сварка. –1991.– № 4(457). – С. 67–69.
361. Поливанов, Ю.В. Исследование способа пайки электрорадиоэлементов на печатные платы лазером непрерывного излучения / Ю.В. Поливанов, Н.Н. Эльманович, Е.Ц. Браславский //

- Вопросы радиоэлектроники. Сер. Технология производства и оборудование. – 1980. – Вып. 1. – С. 47–50.
362. Пайка лучом лазера изделий электронной техники / О.В. Якубович [и др.] // Автоматическая сварка. – 1981. – № 4. – С. 57–59.
363. Лазерная пайка электрорадиоэлементов на печатные платы / А.У. Беялов [и др.] // Электронная промышленность. – 1986. – № 5. – С. 71–72.
364. Поливанов, Ю.В. Техпроцесс пайки микросхем в корпусах с планарными выводами различных типов лазером непрерывного излучения / Ю.В. Поливанов // Информ. листок ВИМИ. – 1987. – № 87–0794. – 3с.
365. Richards, D. Laser Soldering makes its Mark / D. Richards // Electron Prod. – 1987. – V. 16. – № 3. – P. 49–52.
366. Lish, E.F. Laser Tackle tough Soldering Problems / E.F. Lish, M. Marietta // Electron Packages and Prod. – 1984. – V. 24. – № 6. – P. 154–161.
367. Weickert, F. Laserkontaktieren in der Microelektronik / F. Weickert, P. Bartsch // Feingeratetechnik. – 1983. – Bd. 32. – № 10. – S. 465–40.
368. Nakahara, S. Laser Soldering / S. Nakahara, T. Fujita, k. Sugihara // Technology Reports of Kansai university. – 1983. – № 24. – P. 37–43.
369. Laser Flux less Soldering // J. Vac. Science Technology. – 1985. – V.3. – №3. – P.780.
370. Okino, K. YAG Laser Soldering System for Fine Pitch Quad Flat Package / K. Okino, K. Ishikawa, H. Miura // IEEE Intern. Electronic Manuf. Technology Symposium. San Francisco. Calif. 15–17 Sept. 1986. – P. 152–17.
371. Шамарин, Ю.Е. Роботизированный технологический комплекс лазерной пайки интегральных схем / Ю.Е. Шамарин, К.К. Корнеев, А.Д. Наследник // Технология и организация производства. – 1987. – № 3. – С. 11–12.
372. Абакумов, А.В. Лазерная пайка интегральных микросхем на печатные платы / А.В. Абакумов, В.Л. Ланин // Радиопромышленность. – 1991. – № 5. – С. 16–19.
373. Lish, E.F. Laser Microsoldering Addresses Surface-Mount Technology / E.F. Lish // Proceeding 36 th Electronic Components Conf. Seattle, Washington, 5–7 May. – 1986. – P.79–87.
374. Лазерная пайка при монтаже изделий электронной техники / В.А. Дорошенко [и др.] // Весці АН Беларусі. Сер. фіз-мат. навук. – 1992. – № 4. – С.63–67.

375. Хлопков, Ю.В. Позиционная лазерная пайка / Ю.В. Хлопков, В.С. Каменков, А.Н. Сафронов // *Электронная промышленность.*– 1992.– №5.– С. 25–26.
376. Голдберг, Г. Пайка диодным лазером: следующее поколение бесконтактной пайки/ Г. Голдберг // *Электронные компоненты.* – 2004.– № 11. – С. 43–45.
377. Григорьев, В.Н. Монтаж на поверхность: технология, контроль качества./ В.Н. Григорьев, А.А. Казаков, А.К. Джинчарадзе; под общ. ред. И.О. Шурчкова.– М: Издательство стандартов. – 1991. – 184 с.
378. Laserstrahlen helfen in der Lottechnik // *Elektronik Produktion und Pruftechnik.* – 1982.– № 4. – S. 189.
379. Lanin, V.L. Laser Soldering Surface Mount Components / V.L. Lanin, V. M. Bondarik, I.A. Zadrutskiy // *Electronics and Electrical Engineering.* –1999. – №. 4(22).– P. 32-35.
380. Ланин, В.Л. Лазерная пайка и микросварка изделий электроники / В.Л. Ланин // *Электронная обработка материалов.*– 2005.– № 3. – С.79 – 84.
381. Kordas, K. Laser Soldering of Flip-Chips / K. Kordas, A.E. Pap, G. Toth // *Optics and Lasers in Engineering.* – 2006. – № 2. – P.112–121.
382. Ланин, В.Л. Лазерная пайка при сборке электронных модулей / В.Л. Ланин // *Технологии в электронной промышленности.* – 2007. –№ 6.– С. 40–44.
383. Валеv, С. Вакуумная пайка в производстве силовой электроники / С. Валеv // *Силовая электроника.* – 2006.– № 3. –С. 104–108.
384. Bonding of IC bare chips for Microsystems using Ar atom bombardment / A. Kohno [ets] // *Journal of Micromechanics and Microengineering.* – 2001. – V.11. – № 5. – P. 481–486.
385. Ионно-лучевое лужение и пайка полупроводниковых приборов и элементов РЭА / А.П. Достанко [и др.] // *Вестці АН Беларусі.*– 1993. – № 4. – С.53–57.
386. Ланин, В.Л. Пайка ионным лучом в вакууме / В.Л. Ланин, Е.В. Телеш // *Технологии в электронной промышленности.*– 2007. – № 7.– С. 64–68.
387. Telesh, E.V., Component placement in the micropackage with application ion-beam soldering/ E.V. Telesh, V. V. Shulgov // *Workshop on Wafer Bonding for MEMS Technologies, Halle, Germany, 2004.* – P. 75–78.
388. Синкевич, В.Ф. Физические основы диагностирования предельных состояний и обеспечения надежности мощных транзисторов / В.Ф.

- Синкевич // Электронная промышленность.– 1990.– Вып.6.– С. 19-26.
389. Левицкий, Л.М. Электропроводящие клеи для микроэлектроники / Л.М. Левицкий // Зарубежная электронная техника. Научн.-техн. сборник обзоров №7 (339) 1989.– М.: ЦНИИ «Электроника».– С. 62–68.
390. Захаров, А.Л., Расчет тепловых параметров полупроводниковых приборов / А.Л. Захаров, Е.И. Асвадунова. – М.: Радио и связь. – 1983. – 184 с.
391. Закс, Д.И. Параметры теплового режима полупроводниковых микросхем / Д.И. Закс. – М.: Радио и связь. – 1983. – 128 с.
392. Ануфриев, Л.П. Статистическое регулирование процесса монтажа кристаллов мощных транзисторов / Л.П. Ануфриев, А.Ф. Керенцев, В.Л. Ланин // Электроника и электротехника. – Каунас: Технология.– 2000. – № 3 (26).– С. 29–32.
393. Автоматизированный монтаж кристаллов мощных транзисторов / Л.П. Ануфриев [и др.] // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2000.– № 4.– С.32–34.
394. Современное сборочное оборудование для микроэлектроники в Беларуси // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.– 1998.– № 3-4.– С.7-8
395. Ануфриев, Л.П. Автоматизированный монтаж кристаллов транзисторов вибрационной пайкой / Л.П. Ануфриев, А.Ф. Керенцев, В.Л. Ланин // Технологии в электронной промышленности.– 2006.– № 3. –С. 47–50.
396. Ануфриев, Л.П. Исследование процессов монтажа мощных транзисторов на ленточный носитель / Л.П. Ануфриев, В.Л. Ланин, А.Ф. Керенцев // Современные средства связи: матер. 6-й Междунар. науч.-техн. конф. – Нарочь, 2001. – С.224–227.
397. Ануфриев, Л.П. Электрические и тепловые параметры контактов при монтаже кристаллов в приборах силовой электроники / Л.П. Ануфриев, А.Ф. Керенцев, В.Л. Ланин // Электроника и электротехника. –Каунас: Технология. – 2002. –№1 (36). –С. 74–77.
398. Ануфриев, Л.П. Особенности автоматизированного монтажа кристаллов мощных транзисторов / Л.П. Ануфриев, В.Л. Ланин, А.Ф. Керенцев // Современные информационные и электронные технологии: Материалы III Междунар. научн.-практ. конф. – Одесса, 2002. – С. 233.
399. Ulrich, R.K. Advanced Electronic Packaging / Ed. by R.K. Ulrich, W.d. Brown. N.Y.: Wiley Interscience. – 2006. – 812 p.

400. Taraseiskey, H. Power Hybrid Circuit Design and Manufacture / H. T Taraseiskey. – N.Y.: Marcel Dekker Inc.– 1996. –323 p.
401. Whitaker, J.C. Microelectronics / J.C. Whitaker. – N.Y.: CRC. – 2006. – 400 p.
402. Omi S. Causes of cracks in SMD and type specific remedies / S. Omi, K. Fujita // IEEE Trans.Comp. Hybrid, Manufacture Technology. – 1991. – №14. – P. 818-823.
403. Ануфриев, Л.П. Повышение устойчивости транзисторов в корпусе D-Рак к поверхностному монтажу / Л.П. Ануфриев, А.Ф. Керенцев, В.Л. Ланин // Электроника и электротехника Каунас: Технология, – 2003. – № 4 (37).– С. 22–24.
404. Керенцев, А.Ф. Особенности сборки транзисторов в корпусе D-РАК / А.Ф. Керенцев, В.Л. Ланин // Компоненты и технологии. – 2006. – № 9. – С. 138–140.
405. Монтаж кристаллов IGBT транзисторов / Л.П. Ануфриев [и др.] // Современные информационные и электронные технологии: материалы III междунар. научн.-практ. конф. – Одесса, 2007. – С. 308.
406. Hwang, J.S. Solder Material / J.S. Hwang // Surface Mount Technology. – 2000.– № 3. – P. 81– 91.
407. Григорьев, В. Бессвинцовая технология– требование времени или прихоть законодателей от экологии ? / В. Григорьев // Электронные компоненты. – 2001.– №.6.– С. 45–48.
408. Андрущенко, М. Бессвинцовая пайка. Альтернативные сплавы / М. Андрущенко // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2004. – № 5. – С. 47– 49.
409. Припой и покрытия для бессвинцовой пайки изделий микроэлектроники / В.В. Зенин [и др.] // Технологии в электронной промышленности. – 2005.– №5. – С. 46–51.
410. Lopez, E. P. Solderability testing of Sn-Ag-xCu Pb-Free Solders on Copper and Au-Ni-Plated Kovar Substrates /E. P. Lopez, P.T. Vianco, J.A. Rejent // Journal of Electronic Materials. – 2005. –V.34. –№ 3.–P. 299–310.
411. Suganuma, K. Lead-Free Soldering in Electronics / Ed. By K. Suganuma. – N.Y. : Marcel Dekker, 2004. – 342 p.
412. Ланин, В.Л. Бессвинцовая припойная композиция для сборки полупроводниковых приборов / В.Л. Ланин, А.Ф. Керенцев, А.С. Турцевич // Доклады БГУИР. – 2007.– № 2(18). – С. 122–127.

413. Rapeaux, M. Soldered Contacts on High Temperature Superconductors / M. Rapeaux // ICEC`92 Proceeding of the 16-th Int. Conf. on Electrical Contacts, Loughborough, England, 7-11 September, 1992. – P.249–254.
414. Догадин, О. Новейшие стереоувеличители Mantis Macro от фирмы Vision Engineering / О. Догадин // Поверхностный монтаж. – 2006. – № 2 (49). – С.10–12.
415. Шеин, А. Автоматическая оптическая инспекция–наиболее эффективное средство для диагностики и локализации дефектов в процессе производства современных печатных плат / А. Шеин // Поверхностный монтаж. – 2007. – № 5-6 (60). – С. 38–41.
416. Левданский, А. Оптический и рентгеновский контроль печатных плат при помощи одной системы / А. Левданский // Технологии в электронной промышленности. – 2005. – № 6. – С. 52–54.
417. Методы контроля параметров твердотельных структур СБИС / В.А. Емельянов [и др.] – Минск: Бестпринт. – 1998.– 108 с.
418. Бережной, В. П. Выявление причин отказов РЭА / В.П. Бережной, Л.Г. Дубицкий Л. Г. – М.: Радио и связь, 1983. – 232 с.
419. Laserstrahlen helfen in der Lottechnik // Electron Produk. und Pruftechnik.– 1982.– № 4.– S. 189.
420. Vanzetti, R. Laser inspects solder joints for integrity / R. Vanzetti // Electronic Packing and Production. – 1984. –№ 24. – С.116 – 121.
421. Лазерный активный тепловизионный контроль качества пайки микросхем / И.В. Качалов [и др.] // Дефектоскопия. – 1987. – № 11. – С. 92–94.
422. Хлопков, Ю.В. Лазерно-тепловой контроль паяных соединений печатных плат / Ю.В. Хлопков, В.С. Каменков // Приборы и системы управления. – 1993. – № 1. – С. 46–47.
423. Неволин, В. Зондовые нанотехнологии в электронике / В. Неволин. – М.: Техносфера.– 2005. – 150 с.
424. Насонов, А. Некоторые особенности конструирования электронной аппаратуры, обусловленные современными технологиями серийного производства / А. Насонов // Поверхностный монтаж. – 2006. – № 10(55). – С. 16– 19.
425. Клюквин, Н. Системы безадаптерного электрического контроля с летающими пробами– новые горизонты в борьбе за качество / Н. Клюквин // Поверхностный монтаж. – 2007. – № 5-6(60). – С. 26–31.
426. Мартынов, Г. К. Надежность электрических соединений, выполненных пайкой легкоплавкими припоями / Г.К. Мартынов. – М.: Изд-во стандартов, 1968. – 52 с.

427. Афанасьев, М. А. О прочности сцепления серебряных покрытий с керамикой / М.А. Афанасьев, С. А. Дмоховская, И.М. Хомылева // Вопросы радиоэлектроники, Сер. 3.– 1961. – Вып. 6. – С. 45 – 54.
428. Атанасяц, А. М. Методика определения прочности сцепления металлического покрытия с диэлектриком / А.М. Атанасяц, Л.А. Пашкина // Обмен опытом в радиопромышленности. – 1978.- Вып. 11. - С. 34 – 35.
429. Seeba, V. Ceramic-Chip Capacitor Attachment / V. Seeba, R. Sear // IEEE Trans. on Parts, Hybrids and Packaging. – 1977. – Vol. 13. – № 4. – P. 395 – 399.
430. Исследование качества изготовления электронных модулей методом рентгеновского контроля // Поверхностный монтаж. – 2004. – № 7-8. – С. 9.
431. Шмаков, М. Выбор системы рентгеновского контроля. Взгляд технолога / М. Шмаков // Технологии в электронной промышленности. – 2006. – № 4. – С. 60– 68.
432. Буйко, Л.Д. Применение акустической микроскопии для контроля качества сборки изделий электронной техники / Л.Д. Буйко, А.А. Борисов, Л.В. Сологуб // Электронная техника. Сер. Управление качеством. – 1992. – Вып.2(149)–3(150). – С.19– 20.
433. Васильев, А. Использование акустической микроскопии для инспекции многокристалльных модулей / А. Васильев // Поверхностный монтаж. – 2007. – № 10. – С. 20–23.
434. Berhelot, J. H. I. Laser-induced Thermoacoustic Radiation / J.H. Berhelot, I. Bush-Vishneat // J. Acoustic Soc. Amer. – 1985. – V. 78 – № 6. – P. 2074–2076.
435. Brandis, E. Thermal wave Microscopy with electron beams / E. Brandis, A. Rosencwaig // Apply Phys. Letters. – 1980. – V. 37. – № 1. – P. 98–100.
436. Rosencwaig, A. Depth profiling in integrated circuits with thermal wave electron microscopy / A. Rosencwaig // Electron. Letters. – 1980. – V. 16. – № 24. – P.928–930.
437. Deachi, J. Optoacoustic phenomenon in solids / J. Deachi, J. Majina // Proc. FASE-84. – 1984. – P. 117–119.
438. Amer, S., Ash E. A., Newman V. Photo-displacement imaging / S. Amer, E.A. Ash, V. Newman // Electron. Letters. – 1980. – V. 17.– № 10. –P. 337–338.
439. Морозов, А. И. Фотоакустическая микроскопия / А.И. Морозов, В.Ю. Раевский // Зарубежная электронная техника, 1982. – №2.– С. 46–71.

440. Применение фотоакустической микроскопии в диагностировании ИЭТ при разработках и в производстве / Н.В. Рабодзей [и др.] // Электронная промышленность.– 1990. – Вып.7. – С. 44–46.
441. Авербах, В.И. Лазерная фотоакустическая диагностика / В.И. Авербах, С.С. Волкенштейн, С.Б. Школык // Наука и инновации. – 2006. – № 3 (37). – С. 23–25.
442. Волкенштейн, С.С. Лазерная фотоакустическая диагностика скрытых дефектов в изделиях электроники / С.С. Волкенштейн, В.Л. Ланин, А.А. Хмыль // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – № 11. – С. 46–49.
443. Литвинский, И.Е. Обеспечение безотказности микросистемной радиоаппаратуры на этапе производства / И.Е. Литвинский, В.А. Прохоренко, А.Н. Смирнов. – Минск: Беларусь, 1989. – 191 с.
444. Горлов, М.И. Обеспечение и повышение надежности полупроводниковых изделий в процессе серийного производства / М.И. Горлов, Л.П. Ануфриев. – Минск: Бестпринт. – 2003. – 202 с.
445. Медведев, А.М. Технологическое обеспечение надежности межсоединений / А.М. Медведев // Технологии в электронной промышленности. – 2005. – № 5. – С. 60– 61.
446. Технология СБИС. Кн..2. Пер. с англ. / Под ред. С. Зи. – М.: Мир, 1986. – 453 с.
447. Горлов, М.И. Геронтология кремниевых интегральных схем / М.И. Горлов, В.А. Емельянов, А.В. Строгонов. – М.: Наука, 2004. – 240 с.
448. Строгонов, А.В. Оценка долговечности БИС по результатам ускоренных испытаний / А.В. Строгонов // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – № 3. – С. 90–96.
449. Новотник, М. Надежность бессвинцовых электронных узлов / М. Новотник, А. Новиков // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – № 1. – С. 54–57.
450. Kobayashi, M. Reliability of Connections / M. Kobayashi // Review of the Electrical Commun. Lab.–1970. – V.18. – № 7-8. – P. 557–576.
451. Медведев, А.М. Надежно–ориентированное производство аппаратуры специального назначения / А.М. Медведев // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – № 4. – С. 60–64.
452. Медведев, А.М. Модели усталостных разрушений паяных соединений / А.М. Медведев // Производство электроники: технологии, оборудование, материалы. – 2007. – № 2. – С. 41–44.
453. Медведев, А.М. Сборка и монтаж электронных устройств / А.М. Медведев.– М.: Техносфера, 2007. – 256 с.

454. Стриха, В. И. Физические основы надежности контактов металл-полупроводник в интегральной электронике / В.И. Стриха, Е.В. Бузанева. – М.: Радио и связь, 1987. – 256 с.
455. Yoshio, I. Electrical characteristics Schottky barriers on GaAs, prepared by electron beam evaporation / I. Yoshio, O. Tsugunori // *J. Vac. Soc. Japan.* – 1989. – V.32. – № 6. – P.552–560.
456. Nel, M. Deep level transient spectroscopy detection on defects created in epitaxial GaAs after electron-beam metallization /M. Nel , F. D. Aure // *J. Appl. Phys.* – 1988. – V.64. – № 5. – P.2422–2425.
457. Adhesion improvement of Au on GaAs using ion beam assisted deposition / A.J. Kellock, J.E. Baglin, T.T. Bardin, J.G. Pronko // *Nucl. Instrum. and Meth. Phys. Res. B.* – 1991. – V.59. – № 1. – P.249–253.
458. Pouce, F. Lattice structure and electrical properties of epitaxial aluminium on GaAs./ F. A. Pouce, S. J. English // *Thin Solid Films.* – 1983. – V.104. – P. 317–319.
459. Rossnagel, S. Energetic particle bombardment of films during magnetron sputtering /S.M. Rossnagel // *J. Vac. Sci. and Technol. A.* – 1989. – V.7. – № 3. – № 1. – P. 1025–1029.
460. Sputter-induced damage in Al/n-GaAs and Al/p-GaAs Schottky diodes/ D. A. Wandenbroncke, R. L. Van Meirhaeghe, W. H. Laflere, F. Cardon.// *Semicond. Sci. and Technol.* – 1987. – V.2. – № 5. – P.293–298.
461. Anand, Y. Ideality factor and noise characteristics of GaAs diodes prepared by RF-sputtering / Y. Anand, A. Christou, H. Day // *Electron Lett.* – 1980. – V.16. – № 15. – P. 125–128.
462. Достанко, А. П. Использование конических ионных пучков в технологии тонких пленок/А. П. Достанко, В. Я. Ширипов // *Электронная обработка материалов.* – 1982. – № 2. – С. 38–41.
463. Weinman, L. Sputtered TiW/Au Schottky barriers on GaAs./ L. S. Weinman, S. A. Jamison , M. J. Helix // *J. Vac. Sci. and Technol.* – 1981. – V.18. – № 3. – P.238–240.
464. Smith, P. The effect of plasma and ion beam processing on the properties of n-GaAs Schottky diodes / P. J. Smith, D. A. Allan // *Vacuum.* – 1984. – V.34. – № 1–2. – P.209–213.
465. Wang, Y. Summary abstract: effect of ion sputtering on the interface chemistry and electrical properties of Au/ n-GaAs (100) Schottky contacts / Y. X. Wang, P. H. Holloway // *J. Vac. Sci. and Technol.* – 1989. – V.2. – № 2. – P. 567–568.
466. Исследование спектральных характеристик ионных потоков и потоков распыленных частиц в процессах нанесения покрытий методом ионно-лучевого распыления / Е. В. Телеш [и др.]

- //Физические основы и новые направления плазменной технологии в микроэлектронике: матер. межотраслевого научн.-техн. семинара 27–29 июня 1989.– Харьков, 1989. – С. 220.
467. Телеш, Е.В. Исследование потоков заряженных частиц в области подложки при ионно-лучевом распылении различных мишеней / Е. В. Телеш, С. П. Марышев, В. Я. Ширипов // Физика низкотемпературной плазмы: матер.. VIII всесоюзн. конф. – Минск, 1991.–Ч.1.– С.134–135.
468. Телеш, Е.В. Ионно-лучевое формирование контактов металл-арсенид галлия / Е. В. Телеш // Взаимодействие ионов с поверхностью: матер. научно–техн. конф.– М., 1993.– С.121.
469. Телеш, Е.В. Влияние режимов ионно-лучевого распыления на характеристики контактов с барьером Шоттки на арсениде галлия / Е. В. Телеш // Научн. конф. проф.– препод. состава, докторантов, аспирантов и студентов, посвящ. 30-летию деят. коллектива БГУИР: тез. докл. – Минск, 1994. – Ч.1. – С.102–103.
470. Rabinzohn, R. Cleaning of Si and GaAs crystal surface by ion bombardment in the 50-1500 eV range / R. Rabinzohn, G. Gauthier.// Journal of the Electrochem. Soc.–1984. –V.131.– № 4.– P.905–914.
471. Lindstrom, C. Cleaning of GaAs surface with low-damage effects using ion-beam milling / C. Lindstrom // IEEE, ED-30. –1983.– № 6.– P.711–713.
472. Wang, Y. Effect of ion sputtering on the interface chemistry and electrical properties of Au/u-GaAs (100) Schottky contacts / Y.X. Wang, P.H. Holloway // J. Vac. Sci. and Technol.– 1984. – V. 12 (2).– P. 567–568.
473. Sharma, B. Metal-semiconductor Schottky barriers junctions / B. L. Sharma, S. C. Gupta // Solid State Technology.– 1980.– V.13.– № 5.– P.165–170.
474. Телеш, Е. В. Использование пучков ускоренных ионов для формирования границы раздела металл–арсенид галлия / Е. В. Телеш, В. Я. Ширипов // Ионно-лучевая модификация материалов: матер. всесоюзн. конф.– Черногловка, 1987.– С.191.
475. Телеш, Е.В. Исследование термостабильности контактной системы Al/TiB₂/n-GaAs / Е. В. Телеш, А. Н. Пшенко // Состояние и перспективы развития микроэлектронной техники: тез. докл. всесоюзн. научной конф. МРТИ.– Минск, 1985.– Ч.1.– С. 36.
476. Телеш, Е.В. Влияние ионной бомбардировки на параметры контактов с барьером Шоттки на арсениде галлия / Е. В. Телеш //

- Современные проблемы радиотехники, электроники и связи. К 100-летию радио: тез. докл.– Минск,1995.– Ч.II. – С.268–269.
477. Телеш, Е.В. Исследование влияния ионной бомбардировки на толщину переходного слоя контакта Ni/n-GaAs / Е. В. Телеш // Взаимодействие излучений с твердым телом: тез. докл. конф., Минск,1995. – С. 96.
478. Алмаз как теплоотводящий материал: Информация // Электронная техника. Сер. 1, Электроника СВЧ. –1992. – Вып. 9. – С. 133.
479. Брайтч, А.Т. Алмазные теплоотводы для твердотельных приборов/ А.Т. Брайтч // Зарубежная радиоэлектроника.–1991.– № 6.– С. 142–147.
480. Электронная оже–спектроскопия пленок титана на поверхности алмаза/ В. Г. Алешин [и др.] // Поверхность. Физика, химия, механика.– 2001.– № 6.– С. 146–148.
481. Барьерные слои на медных охлаждающих основаниях мощных лазерных диодов / В. В. Баранов [и др.] // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: матер. III междунар. науч.- техн. конф.– Новополоцк: ПГУ.– 2004.– С. 56–59.
482. Теплоотводы на основе искусственных алмазов для мощных лазерных диодов / Г. И. Рябцев [и др.] // Lithuanian J. of Phys.– 1999.– V.39.– № 4–5. – P.389–394.
483. Достанко, А.П. Использование метода осаждения пленок из плазмы в парах металлов для увеличения надежности металлизации интегральных схем/ А.П. Достанко, М.И. Пикуль, С.М. Дудко // Электронная техника, сер.8. –1976. – Вып.9(51).– С.89–97.
484. Андреев, А. А. Применение стационарных эрозионных плазменных ускорителей для получения покрытий (метод КИБ) / Андреев А. А. , В.Г. Брень // Тез. докл. III всесоюзн. конф. по плазменным ускорителям. – Минск, 1976.– С.218–219.
485. Roy, R. Control of microstructure and properties of copper films using ion-assisted deposition / R. A. Roy, J. J. Cuomo, D. S. Yee // J. Vac. Sci. Technol. A6(3).– 1988.– P.1621–1626.
486. Biederman, H. Characterization of an unbalanced magnetron for composite film metal/C:H deposition / H. Biederman, V. Sbzunia // Vacuum.–1999. – V.52. – P. 415–420.
487. Зыков, А.В. Генерация потока ионов из пучкового фокуса / А. В. Зыков, Ю. А. Качанов, В. И. Фареник // Письма в ЖТФ. – 1988. – Т.12.– Вып.10. – С. 593–596.

488. Нанесение DLC покрытий на германиевые окна тепловизионных приборов / В. Я. Ширипов [и др.] // Состояние и перспективы развития вакуумной техники «Вакуум-2001»: тезисы докл. 10-й международной НТК.– Казань, 2001.– С.198–199.
489. Телеш, Е. В. Металлизация поверхностей с алмазоподобной структурой с применением модернизированного ионно-лучевого распыления / Е. В. Телеш, А. П. Достанко, А. В. Ильин // Известия Белорусской инженерной академии.– 2005.– № 1(19)/5. – С.4–6.
490. Телеш, Е.В. Формирование адгезионных слоев к поверхностям с алмазоподобной структурой / Е. В. Телеш, А. В. Ильин // Известия Белорусской инженерной академии. – 2005. – № 2(18)/2.– С. 31–32.
491. Телеш, Е.В. Исследование характеристик системы металлизации алмазных теплоотводов / Е. В. Телеш, А. В. Ильин // Известия Белорусской инженерной академии. – 2004. – № 2(18)/2. – С. 33–34.
492. Телеш, Е. В. Исследование проводящих слоев системы металлизации поверхностей с алмазоподобной структурой / Е. В. Телеш, А. В. Ильин // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: матер. III междунар. науч.-техн. конф., 21–22 мая 2004.– Новополоцк, 2004. – Ч.1. – С.126–128.
493. Достанко, А. П. Ионно-плазменные методы формирования тонкопленочных покрытий / Под ред. А. П. Достанко – Минск: Бестпринт, 2002. – 214 с.
494. Плазменная металлизация в вакууме. /А. П. Достанко [и др.] – Минск: Наука и техника. – 1983. – 279 с.
495. Ивановский, Г. Ф. Ионно-плазменная обработка материалов / Г. Ф. Ивановский, В. И. Петров – М.: Радио и связь, 1986. – 232 с.
496. Способ ионно-плазменного нанесения покрытий на изделия из полимерных материалов: пат. 2192500 Россия, МКИ С23С14/20 / В.П. Сергеев [и др.] – 2000102415/02; заявл. 31.01 2000; опубл. 10.11 2002. – 2002. – № 7.
497. Способ обработки поверхности изделий дуговым разрядом в вакууме и устройство для его осуществления: пат. 2145643 Россия, МКИ С23С14/02. / И.П. Сидоров [и др.]– 98112854/02; заявл. 6.07.1998; опубл. 20.02.2000; Бюл. / Открытия. Изобретения. – 2000. – № 7.
498. Способ нанесения вакуумных металлизированных покрытий на диэлектрические подложки: пат. 93018049 Россия, МКИ С23С14/02 / С.Н. Кучанов. – 93018049/02; заявл. 8.04.1993; опубл. 27. 01. 1996; Бюл. / Открытия. Изобретения. – 1996. – № 6.

499. Гальванотехника: Справ. изд./ Ф.Ф. Ажогин [и др.] – М.:
Металлургия. –1987. – 736 с.
500. Lee, C. Optical coatings on polymethyl methacrylate and polycarbonate
/C. Lee, J.C. Hsu, C. Jaing // Thin Solid Films. – 1997.– V.295.– P.122–
129.



ДОСТАНКО Анатолий Павлович – доктор технических наук, профессор, академик Национальной академии наук Беларуси, заслуженный изобретатель СССР, дважды лауреат Государственной премии Республики Беларусь, заслуженный деятель науки и техники, заведующий кафедрой электронной техники и технологии, автор 600 научных публикаций, 16 монографий, 250 патентов и авторских свидетельств, 6 учебников и учебных пособий.



Ланин Владимир Леонидович – доктор технических наук, профессор кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, лауреат премии Совета Министров Республики Беларусь, автор 5 монографий, 225 научных публикаций, 24 патентов и авторских свидетельств, 10 учебников и учебных пособий.



ТЕЛЕШ Евгений Владимирович – научный сотрудник кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, научные интересы – разработка и исследования процессов формирования тонкопленочных покрытий для микроэлектроники и оптики в вакууме, научная стажировка в компаниях RMI (США), CRT и RSI (Тайвань), автор 14 изобретений и 70 научных публикаций.